

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA**

JOÃO PAULO FERREIRA MARTINS DE SOUZA

**INSPEÇÃO DE DEFEITOS EM REVESTIMENTOS DE
MATERIAIS COMPÓSITOS APLICADOS EM TANQUES
METÁLICOS UTILIZANDO SHEAROGRAFIA**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica na Área de Concentração em Metrologia e Instrumentação da UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA para a obtenção do Grau de MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA.

Orientador: Prof. Dr. Armando Albertazzi Gonçalves Junior.

Coorientador: Daniel Pedro Willemann.

Florianópolis
2012

Catálogo na fonte elaborada pela biblioteca da
Universidade Federal de Santa Catarina

S729i Souza, João Paulo Ferreira Martins de

Inspecção de defeitos em revestimentos de materiais compósitos aplicados em tanques metálicos utilizando shearografia. [dissertação] / João Paulo Ferreira Martins de Souza; orientador, Armando Albertazzi Gonçalves Jr. – Florianópolis, SC, 2012.
126p.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica na Área de Concentração em Metrologia e Instrumentação.

Inclui referências

1. Metrologia. 2. Materiais Compósitos. 3. Tanques Metálicos. 4. Shearografia. I. Gonçalves Jr., Armando Albertazzi. II. Willemann, Daniel Pedro. III. Universidade Federal de Santa Catarina. IV. Título.

CDU 537.7

JOÃO PAULO FERREIRA MARTINS DE SOUZA

INSPEÇÃO DE DEFEITOS EM REVESTIMENTOS DE
MATERIAIS COMPÓSITOS APLICADOS EM TANQUES
METÁLICOS UTILIZANDO SHEAROGRAFIA

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Especialidade Engenharia Mecânica sendo aprovada em sua forma final.

Florianópolis, 27 de fevereiro de 2012

Júlio César Passos, D.Eng. - Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

Armando Albertazzi Gonçalves Junior, Dr. Eng. – Presidente
Orientador

Daniel Pedro Willemann, Dr. Eng. – Co-orientador

Sergio Damasceno Soares, Dr. Eng.

Marco Antonio Martins Cavaco, Ph. D.

Vicente de Paulo Nicolau, Dr.

Hazim Ali Al-Qureshi, Ph. D.

Este trabalho é dedicado às pessoas que sempre acreditaram e apostaram nos
meus sonhos!

Ao meu pai, João Martins de Souza,
À minha mãe, Marilane Ferreira Martins de Souza,
Às minhas irmãs,
Clarissa Ferreira Martins de Souza
e Anna Carolina Aparecida Martins de Souza.

AGRADECIMENTOS

À UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina e ao CENPES Centro de Pesquisa e Desenvolvimento Leopoldo Américo Miguez de Mello por me proporcionar esta oportunidade, estrutura e recursos para conduzir e concluir este trabalho.

À coordenação e programa de pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina por todo suporte e estrutura.

À FEESC – Fundação de Ensino de Engenharia de Santa Catarina e seus colaboradores por todo apoio e estrutura.

Ao meu orientador Professor Armando Albertazzi Gonçalves Jr, por me orientar com muita sabedoria técnica e profissional em todo meu trabalho e por me proporcionar esta oportunidade.

Ao meu co-orientador Daniel Pedro Willemann por confiar, dividir e orientar em todas as desafiadoras etapas deste trabalho.

Ao Sr Sergio Damasceno, coordenador do projeto SHIC pelo CENPES/PETROBRAS por total apoio, orientação e confiança.

Ao Professores, Carlos Alberto Flesh Dr, Eng., Gustavo Daniel Donatelli, Dr, Eng. e Marco Antonio Martins Cavaco, Ph.D., por toda minha formação acadêmica de mestrado.

Ao Sr Vilani, Gerente Técnico da empresa RUST ENGENHARIA e equipe por total apoio em algumas etapas deste trabalho.

Ao Engenheiro da TRANSPETRO Anderson Pacheco e toda equipe de parada de obras do terminal aquaviário da TRANSPETRO em São Francisco do Sul, por todo apoio e orientação em etapas muito importantes deste trabalho, especialmente por proporcionar visita técnica, orientações e informações, cursos de segurança do trabalho que foram imprescindíveis para conclusão do mesmo.

A toda equipe de colaboradores do LABMETRO, Rosana Vieira, David Willemann, Analucia Fantin, Matias Roberto Viotti, Fabricio Luis Broering, Cezar e Rodolfo e toda equipe de colaboradores da Fundação CERTI.

Aos estagiários, Thiago e Arthur.

Aos meus caros e nobres colegas que me acompanharam nos momentos de alegria e dificuldade nesta etapa de minha vida.

Lidiani Pierri, Fernando Jeremias, Rafael Pacheco, Luiz Schalata, James Eger, Cristian Silvano, Fabio Silva, Kamila Lins, Mariah, Pedro Buschinelli, Miguel Burgue, Cintia Alves, Juliana Martins e Heloisa Costa. À minha família e acima de tudo à Deus!

“O maior líder é aquele que reconhece sua pequenez, extrai força de sua humildade e experiência da sua fragilidade.”

Augusto Cury

RESUMO

Ao buscar maior produção, diminuição de custos e melhor atendimento aos requisitos ambientais, o crescente panorama da indústria nacional do petróleo vem investindo ao longo dos anos em pesquisa e desenvolvimento em novas técnicas de inspeção de suas estruturas. Assim, gera-se um grande desafio para os especialistas da área para atender tais necessidades. Esta dissertação apresenta o desenvolvimento conceitual de um sistema de inspeção óptica de revestimentos internos em material compósito aplicado em fundos e costados de tanques metálicos para armazenamento de petróleo e seus derivados. A Shearografia é a técnica de medição óptica utilizada, onde esta, através de um módulo de formação de imagem, iluminação e carregamento, é capaz de detectar imperfeições internas no material inspecionado. Foi confeccionado um corpo de prova simulando uma parede interna de tanque, com revestimento em material compósito, portando defeitos artificiais implantados. Foram sequencialmente desenvolvidos dois protótipos de sistemas de medição, protótipo de avaliação e módulo difrativo compacto, com capacidade de medição de grandes áreas. Ensaio em laboratório e em campo foram realizados. No ensaio em campo foi possível identificar defeitos desconhecidos no revestimento. Nos ensaios em laboratório foi possível identificar os defeitos inseridos artificialmente pelo lado interno e pelo lado externo do corpo de prova. Os resultados obtidos neste trabalho encorajam fortemente a futura prestação de serviços em escala comercial na área de inspeção de compósitos no setor do petróleo.

Palavras-chave: Revestimentos Anticorrosivos, Tanques para Armazenamento de Petróleo, Material Compósito, Interferometria Óptica, Shearografia, Inspeção não-destrutiva.

ABSTRACT

In order to achieve lower costs and better meet environmental requirements, the oil industry has invested over the years in research and development of new nondestructive techniques for composite materials inspection. Consequently, it generates a great challenges for the specialists to meet requirements like reliability and speed of the inspection process. This work presents the conceptual development of an optical system for non-destructive inspection of internal composite material coatings applied on flat bottoms and walls of metal tanks for storage of petroleum and its derivatives. Shearography is the optical technique used to detect internal flaws in the inspected coating. A specimen coated with composite material has been built to simulate an inner wall of a tank in which artificial defects have been inserted. Two prototypes of a shearography system have been designed and built. Their capacity to inspect large areas of the coating has been evaluated. Tests in the laboratory and field have been carried out and the achieved results are shown. The results obtained in this work encourage the application of shearography system able to provide services on a commercial scale to meet future demands of the oil industry.

Keywords: Corrosion Resistant Coatings, Petroleum Storage Tanks, Composite Material, Optical Interferometry, Shearography, Non-Destructive Tests.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Luvas de metaral compósito.....	33
Figura 2.2 - Revestimento em costado e fundo de tanque em material compósito.....	34
Figura 2.3 - Tubulação em material compósito.....	35
Figura 2.4 - Delaminação.....	38
Figura 2.5 - Delaminação em revestimento em tanque.....	38
Figura 2.6 - Imagem do duto analisado com termografia.....	41
Figura 2.7 - Imagem resultantede termografia passiva.....	41
Figura 2.8 - Inspeção holiday detector.....	42
Figura 2.9 - Inspeção holiday detector.....	42
Figura 2.10 - Formação do “speckle”.....	45
Figura 2.11 - Interfômetro de “Michelson”.....	46
Figura 2.12 – Medição por holografia digital.....	48
Figura 2.13 – Medição por shearografia.....	48
Figura 3.1 - Configuração para shearografia inspirada no Interferômetro de “Michelson”.....	49
Figura 3.2 - Sistema de Inspeção por shearografia.....	54
Figura 3.3 - Superfície iluminada por laser de alta potência.....	55
Figura 3.4 - Superfície iluminada por laser de baixa potência.....	55
Figura 3.5 - Cabeçote original.....	56
Figura 3.6 - Cabeçote alternativo.....	56
Figura 3.7 - Sistema de inspeção por shearografia, (1) – Módulo de aquisição de dados, (2) – Módulo de formação de imagens, (3) – Laser, (4) – Computador; processamento e comando e (5) – Objeto em medição.....	56
Figura 3.8 - Carregamento térmico provocado por uma lâmpada de halogênio de 500 W incidindo sobre corpo de prova de aço	59
Figura 3.9 - Subtração dos mapas de fase e identificação do defeito.....	63
Figura 3.10 - Seleção da área do defeito na imagem.....	64
Figura 3.11 - Deslocamento lateral horizontal.....	64
Figura 3.12 - Deslocamento lateral vertical.....	64
Figura 4.1 - Evolução dos módulos de formação da imagem - (A) Módulo de formação de imagem com Interferômetro de Michelson (B) Protótipo de avaliação da grade difrativa, (C) Módulo difrativo.....	67
Figura 4.2 - Vista em perspectiva do módulo de avaliação.....	69

Figura 4.3 - Vista explodida do layout dos componentes ópticos...	70
Figura 4.4 - Vista superior do layout do módulo de avaliação.....	71
Figura 4.5 - Grade difração.....	72
Figura 4.6 - Redes de difração com estrutura periódica de fase na forma de dentes de serra.....	73
Figura 4.7 - Deslocamento de fase por atuação de um PZT em uma grade de ordem $m=0$ e $m+1$. (A) Antes do deslocamento de fase. (B) Após deslocamento de fase.....	74
Figura 4.8 - Grade posicionada 0 mm do CCD.....	76
Figura 4.9 - Grade posicionada 7 mm do CCD e 0 mm da lente.....	76
Figura 4.10 - Grade posicionada 2 mm do CCD.....	77
Figura 4.11 - Grade posicionada 4 mm do CCD.....	77
Figura 4.12 - Cabeçote final vista 3D.....	78
Figura 4.13 - Cabeçote final vista superior.....	78
Figura 4.14 - Laser de estado sólido de 400 mW.....	78
Figura 4.15 - Módulo de iluminação com conjunto de lentes expansoras.....	78
Figura 4.16 - Corpo de prova de $1,5 \times 1,5 \text{ mm}^2$ iluminado pelo módulo de iluminação.....	79
Figura 4.17 - Carregamento térmico aplicado no fundo de tanque.	80
Figura 4.18 - Carregamento térmico aplicado em um corpo de prova de $1,5 \times 1,5 \text{ m}^2$	81
Figura 4.19 - Fixação do tripé por ventosas.....	82
Figura 4.20 - Sistema sucção de vácuo para as ventosas.....	82
Figura 4.21 - Suporte por tripé aplicado na inspeção do fundo de um tanque.....	82
Figura 5.1 - Carregamento térmico por transmissão.....	83
Figura 5.2 - Carregamento térmico por reflexão.....	84
Figura 5.3 - Projeto corpo de prova com defeitos artificiais.....	85
Figura 5.4 - Sequência de camadas do revestimento.....	85
Figura 5.5 - Especificação das camadas.....	86
Figura 5.6 - Especificação dos defeitos artificiais implantados. (coordenadas em milímetros).....	87
Figura 5.7 - Aspecto externo do corpo de prova final.....	88
Figura 5.8 - Carregamento térmico interno.....	89
Figura 5.9 - Ensaio por reflexão, carregamento térmico interno.....	89
Figura 5.10 - Resultado do carregamento térmico interno.....	90

Figura 5.11 - Região externa do corpo de prova. Elipse vermelha ilustra a posição do defeito “g” no revestimento da região interna.....	92
Figura 5.12 - Defeito “g” identificado por carregamento térmico por transmissão.....	93
Figura 5.13 - Carregamento por reflexão realizado a partir do lado externo do corpo de prova.....	93
Figura 5.14 - Carregamento térmico externo por reflexão.....	94
Figura 5.15 - Região do aço sob os defeitos “a” e “b”.....	95
Figura 5.16 - Identificação dos defeitos “a” e “b”.....	95
Figura 5.17 - Tanque de armazenamento de petróleo.....	96
Figura 5.18 - Fundo e costado de tanque.....	97
Figura 5.19 - Seleção da área de inspeção.....	98
Figura 5.20 - Limpeza e marcação da área de inspeção.....	99
Figura 5.21 - Marcação das áreas A1 a A14.....	99
Figura 5.22 - Área de costado e fundo de tanque selecionada para inspeção.....	100
Figura 5.23 - Inspeção do fundo de tanque junto ao costado.....	100
Figura 5.24 - Verificação do funcionamento do sistema.....	101
Figura 5.25 - Verificação do sistema - imagem ao vivo.....	102
Figura 5.26 - Verificação do sistema - resultado.....	102
Figura 5.27 - Defeitos encontrados na inspeção área 1.....	103
Figura 5.28 - Defeitos encontrados na inspeção área 2.....	104
Figura 5.29 - Visualização das áreas 1 e 2.....	104
Figura 5.30 - Defeitos encontrados na inspeção da área 13.....	105
Figura 5.31 - Visualização da área 13.....	105
Figura 5.32 - Defeitos encontrados na inspeção área 14.....	106
Figura 5.33 - Visualização da área 14.....	106
Figura 5.34 - Áreas 1, 2, 13, e 14, área 14 e 13 sobreposta em 1 e 2.....	107
Figura 5.35 - Visualizações das áreas 1, 2, 13 e 14.....	107
Figura 5.36 - Marcação das áreas 4, 5, 6, 7, 8, 9 10 e 11.....	108
Figura 5.37 - Imagem das áreas A4 a A11.....	108
Figura 5.38 - Aproximação da imagem das áreas 4 a 11.....	109
Figura 5.39 - Área inspecionada em fundo de tanque junto ao costado.....	110
Figura 5.40 - Inspeção de costado.....	111
Figura 5.41 - Resultado de inspeção da segunda área do costado...	111

TABELAS

Tabela 2.1 - Natureza dos constituintes.....	32
Tabela 2.2 - Tipos de materiais compósitos.....	32
Tabela 2.3 - Defeitos comuns em materiais compósitos....	36
Tabela 3.1 - Principais tipos de carregamentos e sua aplicabilidade para detecção de defeitos.....	62
Tabela 4.1 - Campos de visão.....	69
Tabela 4.2 - Deslocamentos laterais, posições sensor-lente e módulo.....	75
Tabela 5.1 - Especificação do corpo de prova.....	87

EQUAÇÕES

Equação 3.1 - Relação entre a intensidade de um ponto na imagem dupla e a respectiva diferença de fase.....	51
Equação 3.2 - Intensidade resultante.....	51
Equação 3.3 - Intensidade em cada ponto.....	51
Equação 3.4 - Alteração de fase.....	52
Equação 3.5 - Intensidade adquirida.....	52
Equação 3.6 - Valor da fase do ponto considerado.....	52
Equação 4.1 - Direção de propagação.....	72

LISTA DE ABREVIATURAS

END – Ensaio Não-Destrutivo

DPSI ou ESPI - (*Electronic Speckle Pattern Interferometry*) –
Holografia Eletrônica

SPSI - (*Speckle Pattern Shearing Interferometry*) – Shearografia

CCD - (*Charge Coupled Device*) – Dispositivo de Carga Acoplada

DAQ - (*Data Acquisition*) – Placa de Aquisição de Dados

PZT - Atuador Piezoelétrico – Piezocerâmico, Ziconato de Titanato

PRFV - Polímero Reforçado com Fibra de Vidro

δx – Deslocamento Lateral

δL – Delocamento do PZT

SAE - Society of Automotive Engineers

ASTM - American Society for Testing and Materials

API - American Petroleum Institute

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	27
1.1 MOTIVAÇÃO.....	27
1.2 OBJETIVOS.....	28
1.3 MÉTODOS.....	28
1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	30
2 MATERIAIS COMPÓSITOS.....	30
2.1 FUNDAMENTOS.....	30
2.1.1 Fase contínua (Matriz).....	30
2.1.2 Fase Dispersa.....	31
2.1.3 Tipos de Materiais Compósitos.....	32
2.2 APLICAÇÃO NA INDÚSTRIA DO PETRÓLEO E GÁS.....	33
2.3 DEFEITOS COMUNS EM MATERIAIS COMPÓSITOS.....	35
2.4 TÉCNICAS DE INSPEÇÃO EM MATERIAIS COMPÓSITOS.....	39
2.4.1 Inspeção Visual.....	39
2.4.2 Emissão Acústica.....	40
2.4.3 Termografia.....	40
2.4.4 Holiday Detector.....	41
2.4.5 Ultrasom.....	42
2.4.6 Radiografia Industrial.....	43
2.4.7 Tomografia Computadorizada.....	43
2.4.8 Holografia.....	44
2.4.9 Shearografia.....	47
3 SHEAROGRAFIA.....	49
3.1 PRINCÍPIOS FUNDAMENTOS.....	49
3.1.1 Diferença de Fase.....	50
3.1.2 Deslocamento de Fase.....	52
3.1.3 Processamento das Imagens.....	53
3.2 EQUIPAMENTO CLÁSSICO.....	54
3.3 TÉCNICAS DE CARREGAMENTO.....	57
3.3.1 Carregamento Mécânico.....	57
3.3.2 Carregamento Térmico.....	58
3.3.3 Vácuo.....	60
3.3.4 Carregamento Vácuo.....	61
3.3.5 Tabela dos tipos de Carregamentos.....	62
3.4 INTERPRETAÇÃO DAS IMAGENS.....	63

4 SISTEMA DE SHEAROGRAFIA PARA GRANDES	
ÁREAS.....	65
4.1 TANQUES.....	65
4.2 REQUISITOS.....	66
4.3 MÓDULO DE FORMAÇÃO DE IMAGEM DE	
SHEAROGRAFIA PARA GRANDES ÁREAS.....	66
4.3.1 Módulo de Formação de Imagens com Interferômetro	
de Michelsin (MIM).....	67
4.3.2 Protótipo de Avaliação da Grade Difractiva.....	68
4.3.3 Rede de Difração.....	71
4.3.4 Estudo de Otimização de Leiaute.....	75
4.3.5 Módulo Difractivo Compacto (MD).....	77
4.4 MÓDULO DE ILUMINAÇÃO.....	78
4.5 MÓDULO DE CARREGAMENTO.....	80
4.6 SISTEMA DE FIXAÇÃO E SUPORTE.....	81
5 AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL.....	83
5.1 METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO.....	83
5.2 CORPO DE PROVA.....	84
5.3 ENSAIOS EM CAMPO.....	88
5.3.1 Carregamento Térmico Interno.....	88
5.3.2 Carregamento Externo.....	91
5.4 ENSAIOS EM CAMPO.....	95
5.4.1 Tanque de armazenamento de petróleo.....	95
5.4.2 Procedimento de Inspeção Adotado e Resultados.....	97
6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	112
6.1 ASPECTOS POSITIVOS.....	112
6.2 ASPECTOS NEGATIVOS E POSSÍVEIS MELHORIAS.....	113
6.3 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	114
REFERÊNCIAS.....	116

1 INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÃO

As indústrias do petróleo e derivados têm mostrado interesse crescente na aplicação de revestimentos anti-corrosivos constituídos a base de materiais compósitos. Resinas reforçadas com fibras de vidro ou carbono estão entre os materiais compósitos mais utilizados para revestir interiores e exteriores de tanques e tubulações em geral. Sua aplicação, feita em campo, em condições não ideais, algumas vezes, contém defeitos como bolhas de ar, falta de adesão, quantidade insuficiente de resina, delaminações e inclusões [1] [2].

Como técnicas de detecção de regiões defeituosas, as mais usadas nos dias de hoje são a inspeção visual e a técnica de percussão. Esta última consiste em identificar regiões defeituosas a partir do som de “algo oco”, em resposta a uma pequena percussão da região inspecionada. Busca-se uma forma mais confiável, repetitiva e menos dependente das habilidades do inspetor para identificar regiões defeituosas [1] [2].

Denominada por shearografia, a técnica óptica interferométrica tem sido intensamente usada com sucesso para detectar defeitos em materiais compósitos nas indústrias aeroespaciais e navais. Até o presente, pouco tem sido aplicado nas indústrias do petróleo, petroquímica e química [3].

Utilizando esta técnica, a presença de defeitos é denunciada por anomalias nos mapas de franjas de interferência resultantes da resposta do material compósito à aplicação de um carregamento externo, normalmente térmico, por vácuo, por vibrações ou por variação da pressão interna, sendo este último adequado para tubulações e vasos de pressão [4].

A inspeção de revestimentos protetores de materiais compósitos aplicados em tanques de armazenamento de petróleo é uma operação importante. Falhas de adesão podem resultar no rompimento do revestimento e acelerar o processo de corrosão da parede metálica do tanque, o que reduziria sua vida útil, podendo ocasionar ruptura e vazamentos desastrosos [5].

É importante que sejam realizadas inspeções eficientes logo após a aplicação do revestimento, comprovando sua integridade e inspeções posteriores rápidas com periodicidade compatível com as paradas de manutenção naturais [5].

Tem-se como exemplo, a TRANSPETRO-S.A, empresa subsidiária integral da PETROBRAS, que atende às atividades de transporte e armazenamento de petróleo e derivados, álcool, biocombustíveis e gás natural. Possui uma capacidade de armazenamento de 10 milhões de m³, diluídos em 20 terminais terrestres e 28 terminais aquaviários, além de possuir uma frota de 54 navios [6].

Todas estas unidades podem utilizar ou já utilizam revestimentos de materiais compósitos de baixa espessura, e representam uma ampla demanda de possível aplicação da técnica de inspeção óptica por shearografia.

A otimização de um sistema comercialmente aplicável, com tempo de inspeção atrativo, caberia como uma excelente alternativa para ensaios não destrutivos em estruturas aqui descritas.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é contribuir para o aumento da segurança operacional de tanques revestidos com materiais compósitos usados na indústria do petróleo e gás.

Em termos específicos, os objetivos do trabalho são desenvolver e validar os conceitos de um sistema óptico usando shearografia para inspeção de defeitos em revestimentos de materiais compósitos aplicados em fundos e costados de tanques usados na indústria do petróleo e gás.

1.3 MÉTODOS

Para atingir os objetivos da dissertação, os trabalhos foram desenvolvidos envolvendo as seguintes etapas:

- Levantar demandas e restrições envolvidas na inspeção de fundos e costados de tanques revestidos por materiais compósitos;
- Projetar e construir corpo de prova com chapa calandrada para simular parede de tanque com revestimento em material e defeitos conhecidos;
- Elaborar projeto óptico mecânico, construir e validar um novo módulo de inspeção apropriado para inspecionar grandes áreas;
- Projetar sistema óptico mecânico de módulo de iluminação para grandes áreas com o uso de laser;
- Especificar e testar sistema de carregamento térmico para inspecionar grandes áreas;

- Especificar e testar sistema de suporte e fixação do sistema;
- Planejar e realizar ensaio piloto em campo em tanque com revestimento em material compósito;
- Analisar e interpretar imagens coletadas nos ensaios e propor melhorias;
- Com base na experiência adquirida, elaborar recomendações para realizar inspeção em fundos e costados de tanques revestidos.

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

No segundo capítulo é apresentada uma revisão bibliográfica sobre materiais compósitos, seus fundamentos, aplicações na indústria do petróleo e gás, defeitos comuns e técnicas de inspeção.

No terceiro capítulo é abordada a técnica de inspeção óptica shearografia, seus fundamentos, equipamentos clássicos, técnicas de carregamento e interpretação das imagens.

No quarto capítulo é apresentado, passo-a-passo, o desenvolvimento do sistema de inspeção de shearografia para grandes áreas, iniciando com uma fundamentação sobre tanques e após os requisitos necessários para execução do trabalho. Em seguida, são apresentados o módulo de formação da imagem compacto, módulo de iluminação, módulo de carregamento para grandes áreas e módulo de fixação e posicionamento.

A avaliação experimental é apresentada no quinto capítulo. É composta pelos seguintes tópicos: Metodologia de Avaliação, Corpo de Prova, Ensaios em Laboratório: Carregamento Interno e Externo e Ensaios em Campo.

O sexto e último capítulo trata das Conclusões e Recomendações sobre o sistema projetado e seus resultados.

2 MATERIAIS COMPÓSITOS

2.1 FUNDAMENTAÇÃO

O crescimento das indústrias automotiva, química e aeronáutica nas últimas décadas motivou a busca por materiais modernos que reúnem propriedades importantes como, resistência mecânica, resistência a corrosão e baixo peso em um só composto. Promoveu-se assim, a procura pelos materiais compósitos, o qual se encaixa nas características de um produto inovador que atenda tais necessidades industriais.

O material compósito, ou simplesmente compósito, é a combinação de dois ou mais materiais quimicamente diferentes com interfaces distintas, onde a união de suas propriedades e características compõe um material com propriedades melhores do que as de cada constituinte separado [7] [8].

Os compósitos geralmente são constituídos por duas fases: a fase contínua, denominada matriz e a fase dispersa, que proporciona as propriedades adicionais no composto, como reforço, resistência à fadiga e baixa densidade. A fase dispersa pode ser na forma de fibras ou particulados [7] [8].

2.1.1 Fase contínua (Matriz)

A matriz, que sozinha não é muito resistente, tem duas funções principais no compósito: ela atua como um meio de transferência de carga para a fase dispersa e como interface fibra-matriz que deflete pequenas trincas, assim tornando o conjugado mais hábil a resistir às trincas, do que seus componentes constituintes em separado [9].

A escolha da matriz irá determinar fatores como a temperatura de serviço, processamento e durabilidade. As matrizes podem ser metálicas ou poliméricas; as poliméricas podem ser termoplásticas ou termofixas [10].

Matrizes Termofixas curam formando uma rede de ligações cruzadas de modo irreversível. O tempo e a temperatura de cura influenciam em suas características. Uma cura incompleta afeta as propriedades mecânicas, a solubilidade a solventes e a tolerância à umidade, como também pode gerar maior distância entre ligações cruzadas aumentando a flexibilidade e a tenacidade do material [10].

Os termoplásticos são reprocessáveis, pois adquirem sua configuração por amolecimento. O uso de termoplásticos em compósitos permite outros meios de processo, como injeção e extrusão.

A morfologia de um termoplástico pode ser amorfa ou semicristalina parcialmente ordenada. De modo geral, os semicristalinos são mais resistentes a solventes do que os amorfos [10].

2.1.2 Fase Dispersa

A fase dispersa em forma de partículas geralmente é mais dura e mais rígida que a matriz. Assim, a matriz transfere parte das tensões aplicadas às partículas que suportam uma fração desta carga [7] [8].

Na forma de fibras, a fase dispersa também é mais resistente e rígida que a matriz e transfere as tensões suportadas pela mesma. Porém, sua ductilidade é limitada. As fibras podem ser curtas ou longas dependendo do tipo de processamento, influenciando nas propriedades do compósito [7] [8].

Os tipos de fibras mais usados na indústria são as fibras sintéticas como as fibras de carbono, aramida, polipropileno, poliéster e etc. Também são comumente usadas as fibras de vidro, devido à sua boa relação custo/benefício. O PRFV é um composto de finíssimos filamentos de vidro aglomerados, que apesar de sua rigidez, tornam-se altamente flexíveis quando adicionados à resina poliéster [11].

Existem também as fibras naturais e fibras celulósicas que se encontram em expansão na pesquisa e no mercado devido a fatores ambientais [11].

A orientação das fibras é um fator importante para ser considerado em função do seu processo e de sua aplicação. Essa orientação é definida antes do processamento e leva em conta a direção dos esforços a que a estrutura compósita será submetida. A resistência do compósito é maior quando as tensões são aplicadas na direção longitudinal da fibra [7] [8].

As fibras podem ser unidirecionais, bidirecionais e tridimensionais. As lineares podem ser contínuas ou descontínuas. A contínua é usada normalmente em estruturas laminadas onde se pode controlar o ângulo de aplicação. A fibra descontínua é diretamente misturada com a matriz sem controle de orientação das mesmas [7] [8].

2.1.3 Tipos de Materiais Compósitos

São muitos os tipos de materiais compósitos no mercado, onde as combinações de seus constituintes, natureza dos materiais, suas propriedades e características, são otimizadas para atender requisitos da aplicação específica requerida. A natureza dos constituintes e tipos de compósitos, suas característica e aplicações é exemplificada na Tabela 2.1 e 2.2.

Tabela 2.1 – Natureza dos constituintes.

Fases			Materiais
Matrizes	Metálicas		Ligas de Carbono, Alumínio, Magnésio, Titânio, Cobre, Níquel, Cobalto e etc
	Poliméricas	Termoplástico	Polipropileno, Poliamida
		Termofixo	Resina Epóxi, Fenólica, Poliuretano
Fase Dispersa	Fibras		Fibras de Vidro, Kevlar, Aramida, Carbono etc
	Particulados		Areia, Brita, Cobre, Negro de Fumo

[7] [8] [9] [10] [11]

Tabela 2.2 - Tipos de materiais compósitos.

Tipos	Características	Aplicações
Compósitos Poliméricos	São compostos com matriz polimérica termofixas ou termoplásticas reforçadas por fibras	Automotivo, aeronáutica, espacial, naval, óleo e gás, revestimentos anticorrosivos
Compósitos Laminados	São múltiplas camadas de fibras contínuas sobre uma matriz	Naval, espacial, óleo e gás e construção civil
Compósitos Híbridos	Formados por combinações de diferentes tipos de fibras em diferentes camadas	Móveis, esportiva, construção civil
Laminados Sandwich	Camadas finas de fibra reforçadas com polímeros, ligadas a um núcleo espesso de “ <i>honeycomb</i> ”	Balsas (marítima), indústria aeroespacial
Fibra Descontínua	Distribuídas aleatoriamente.	Automotiva, partes computacionais e elétricas
Particulados	Partículas dispersas em matrizes diversas	Concreto, Borracha e Pneu

[7] [8] [9] [10] [11].

2.2 APLICAÇÃO NA INDÚSTRIA DO PETRÓLEO E GÁS

Os compósitos poliméricos reforçados por fibra possuem elevada resistência química, térmica e mecânica. Tais propriedades são de importância fundamental para aplicação na indústria petrolífera onde a resistência à corrosão, desempenho térmico e estrutural são requisitos básicos de todo processo de perfuração, elevação, transporte e armazenamento de derivados de petróleo e gás [12].

A matriz geralmente é termofixa e as fibras mais utilizadas são as fibras de vidro [11]. Diversas são as aplicações, como revestimentos anticorrosivos em tubos, dutos e luvas de materiais compósitos. Estas consistem em revestimento externo de resina epóxi, poliéster e vinílica com fibra de vidro [13] [14], como visto na Figura 2.1. Este material tem a vantagem de possibilitar aplicação sem comprometer a produção de petróleo, por evitar uso de chama ou arco de solda [1].

Figura 2.1 – Luvas de material compósito.



[14].

Materiais compósitos também são utilizados como revestimento anticorrosivos em tanques de armazenamento de petróleo e derivados. A resina mais utilizada é a Ester Vinílica com fibra de vidro, como mostrado na Figura 2.2 [15].

Figura 2.2 – Revestimento em costado e fundo de tanque em material compósito.



[16].

O revestimento é aplicado no tanque sobre esta região crítica proporcionando uma proteção corrosiva de vida útil longa. A aplicação do revestimento possibilita paradas de manutenção de menor tempo e menor frequência, reduzindo os custos de operação e manutenção da estrutura [17].

Graças às propriedades estruturais e de baixo peso, os materiais compósitos são aplicados na fabricação de estruturas marítimas como tubulações e dutos em instalações fixas ou flutuantes. São aplicados também na fabricação de tubulações enterradas "*onshore*" [18].

A aplicação estrutural é especificada por [18] e possui como materiais utilizados resinas epóxi, fenólicas, estér vinílicas e poliéster com fibra de vidro, como ilustra a Figura 2.3.

Com propósito de redução de peso e custos com manutenção contra corrosão, nas plataformas e embarcações petrolíferas "*offshore*" também existem aplicações de materiais compósitos em equipamentos diversos como vasos de pressão, tanques, "*risers*", estruturas navais de sustentação, marquises, paredes, pisos, grades de sustentação, apoios, cascos e etc [12] [18].

Figura 2.3 – Tubulação em material compósito.



[19].

A aplicação de reparos em estruturas metálicas utilizando materiais compósitos também é frequente devido ao fato de não ser necessária a parada da produção para manutenção [14].

A principal limitação do material compósito é a máxima temperatura de trabalho, que oscila entre 70°C para poliéster e 150°C para resina fenólica, ocasionando problemas em aplicações que ultrapassam tais limites de temperatura [18].

2.3 DEFEITOS COMUNS EM MATERIAIS COMPÓSITOS

Os compósitos que exercem funções estruturais, em sua grande maioria, são de matrizes termofixas, como resina epóxi, resina fenólica e éster vinílica. Entretanto este tipo de compósito convive com alguns problemas, como tensões residuais, devido às condições de processamento e à natureza quebradiça dos sistemas termofixos, o que resulta em micro fissuras na matriz e, consequentemente, na deterioração de suas propriedades [10] [11].

Em comparação com os metais, os materiais compósitos têm a desvantagem de serem mais susceptíveis aos danos. Estes podem ocorrer durante as fases de processamento da matéria prima, fabricação da peça, manuseio, transporte e armazenamento. Possuem diversas formas como

descontinuidades das fibras, porosidade, delaminações, áreas pobres ou ricas em resina ou em operações que envolvam abrasão e/ou erosão [10] [11].

Quando o material é exposto aos efeitos ambientais, como temperatura, umidade e radiação ultravioleta, as suas propriedades físicas e mecânicas podem sofrer degradações. A maior parte dos danos é resultado de impactos de baixa energia, que originam danos imperceptíveis à inspeção visual. Algumas vezes, esses danos são provocados por impactos de alta energia, podendo causar delaminações, perda de resina e fratura [10] [11].

O defeito mais comum encontrado na área em estudo deste trabalho é a delaminação, que pode ser originada também por mau processamento do material compósito ou até da resina, gerando assim uma cura imperfeita. A delaminação pode ser ocasionada ainda por propagação de trinca ocasionada por esforço ou até por ação química de corrosão. Esta trinca pode conduzir a uma infiltração no revestimento e gerar um deslocamento do material compósito em seu substrato, que pode ser outra camada de compósito ou até uma base metálica onde este foi aplicado [10] [11].

Segundo [20], os principais defeitos em materiais compósitos podem ser classificados como dispostos na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 – Defeitos comuns em materiais compósitos.

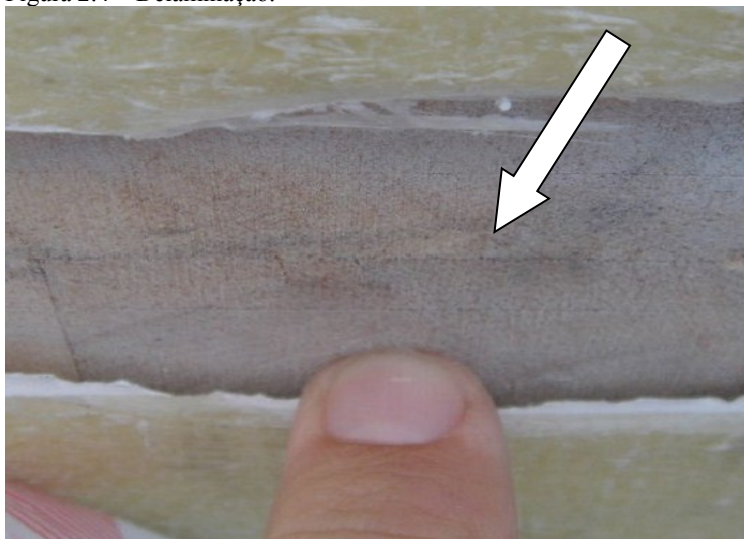
Tipos de Defeitos	Especificação do Defeito
Lasca	Um pequeno pedaço quebrado na borda ou na superfície
Rachadura	Uma separação real do laminado, visível na superfície oposta, e se estendendo através da espessura
Micro rachaduras	Rachaduras finas ou sob a superfície de um laminado
Delaminação de borda	Separação das camadas de materiais à beira de um laminado
Delaminação interna	Separação das camadas de um material em um laminado
Inclusões (metálico)	Partículas metálicas incluídas em um laminado
Inclusões (não)	Partículas não metálicas incluída no laminado

metálicos)	
Fratura	Ruptura da superfície do laminado sem penetração total
Bolha de ar	Aprisionamento de ar dentro e entre as camadas de reforço
Queimaduras	Apresenta indícios de decomposição térmica, descoloração
Olho de peixe	Massa globular pequena que não se misturou completamente no material circundante
Falta de Resina	Uma área, ocorrendo geralmente na beira de um plástico laminado, onde o reforço não foi molhado com resina
Casca de Laranja	Superfície irregular que se assemelha a uma casca de laranja
Borbulha	Pequena elevação, aguda, ou crônica na superfície de um laminado
Pites	Cratera na superfície de dimensão da mesma ordem de grandeza que sua profundidade
Porosidade	Presença de numerosos poços visíveis
Pré gel	Uma camada extra, não intencional, da resina curada em uma parte da superfície do laminado
Resina de bolso	Um acúmulo aparente de excesso de resina em uma pequena área localizada dentro do laminado
Resina de borda	Insuficiente material de reforço na borda de peças moldadas de laminado
Depressão	Depressão na superfície de um laminado moldado onde tem recolhido a partir do molde
Fenda	Alongado aprisionamento de ar que é dentro ou perto da superfície de um laminado e pode ser coberta por uma fina película de resina curada
Rugas	Em uma estratificação, uma imperfeição que tem a aparência de uma onda moldado em uma ou mais lonas de tecido ou outro material de reforço

[20].

As Figuras 2.4 e 2.5 mostram delaminações em revestimentos de materiais compósitos.

Figura 2.4 – Delaminação.



[21].

Figura 2.5 – Delaminação em revestimento.



2.4 TÉCNICAS DE INSPEÇÃO EM MATERIAIS COMPÓSITOS

A família de técnicas de inspeção mais utilizada em materiais compósitos é a de ensaios não destrutivos. Ela se caracteriza por avaliar a qualidade de materiais acabados ou semi acabados para verificar a existência ou não de descontinuidades ou defeitos, sem alterar suas características sem interferir em seu uso posterior [22].

Ensaio não-destrutivo são usados com o objetivo de garantir a qualidade, aumentar a confiabilidade da inspeção e segurança de processos. São utilizados na fabricação, construção, montagem e manutenção. São largamente aplicados em soldas, fundidos, forjados, laminados, plásticos, concreto, entre outros. Abrangem os setores petróleo/petroquímico, nuclear, aeroespacial, siderúrgico, ferroviário, naval, eletromecânico e automotivo [22].

As principais técnicas não destrutivas que podem ser utilizados em materiais compósitos são:

- Inspeção Visual
- Emissão Acústica
- Termografia
- *Holiday Detector*
- Ultrassom
- Radiografia
- Tomografia Computadorizada
- Holografia
- Shearografia

2.4.1 Inspeção Visual

Inspeção visual é largamente utilizada para avaliar as condições ou qualidade de qualquer tipo de peça ou componente. É de simples execução, de baixo custo, não requer equipamento especial, somente experiência do inspetor.

É comumente utilizada em juntas soldadas, revestimentos, superfícies e peças de grande porte, onde uma rápida detecção e correção de defeitos significam economia de tempo e custo. É considerado um método primário nos programas de controle de qualidade.

A inspeção visual requer boa visão, boas condições de iluminação e experiência no reconhecimento de defeitos. Alguns equipamentos também podem ser usados, tais como: lupas de pequeno aumento e câmeras [23].

2.4.2 Emissão Acústica

A técnica de emissão acústica ocorre quando uma descontinuidade é identificada através de ondas sonoras emitidas por um material em resposta a uma atuação térmica ou mecânica. Uma área contendo defeitos é uma área de concentração de tensões que, uma vez estimulada por um esforço externo, origina uma redistribuição destas mesmas tensões. Esta redistribuição gera no corpo em teste, perturbações através da liberação de ondas mecânicas transientes, que são “escutadas” por transdutores piezelétricos distribuídos de forma estacionária sobre a estrutura.

Estes receptores passivos, estimulados pelas ondas transientes, transformam a energia mecânica em elétrica sendo os sinais digitalizados, processados, analisados e armazenados.

A técnica detecta as descontinuidades nos estágios iniciais e permite que toda a superfície do equipamento em teste seja testada em um único ensaio. A vantagem desta técnica está na possibilidade de realizar o teste com o equipamento em operação [24].

2.4.3 Termografia

A termografia infravermelha é uma técnica que possibilita a medição de temperaturas a partir da captação de imagens que revelam a radiação infravermelha emitida ou refletida da superfície de um corpo [4] [25]. Esta radiação é naturalmente emitida por corpos e depende da temperatura e emissividade, ou seja, a capacidade de emitir calor da superfície. Quanto mais quente o objeto, maior a quantidade de radiação emitida [4] [25].

A imagem termográfica, ou termograma, é normalmente representada em escala de cores, ou de forma monocromática, por via de um termovisor. Suas aplicações estão em variados setores industriais, principalmente, nos setores de geração de energia elétrica, automobilístico, químico e engenharia civil [4] [23].

Como técnica de detecção de defeitos, a termografia pode ser classificada como passiva e ativa [4]. A técnica passiva capta a radiação distribuída, naturalmente, existente no corpo avaliado e relaciona a distribuição dessa radiação em função das falhas. A ativa consiste na aplicação controlada de cargas térmicas externas no corpo de prova, captando sua distribuição da temperatura da superfície.

Nas áreas de superfície do material imediatamente acima do defeito, ou seja, áreas subsuperficiais, o fluxo de calor é reduzido pela presença da falha, assim causando um aumento de temperatura no local [23].

Essa técnica trata a sequência de dados adquiridos antes e depois do pulso de aquecimento como uma coleção de *pixels* independentes [25]. A Figura 2.6 mostra a imagem de um tubo de PRFV e a Figura 2.7 mostra a sua imagem termográfica.

Figura 2.6 – Imagem do duto analisado com termografia.

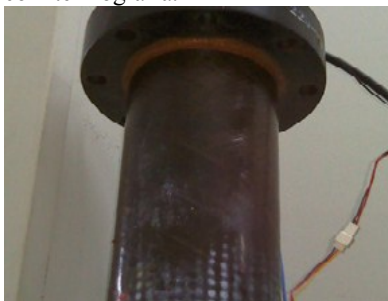


Figura 2.7 - Imagem resultante de termografia passiva.



2.4.4 Holiday Detector

Este ensaio, ilustrado nas Figuras 2.8 e 2.9, possibilita a identificação de micro porosidades em revestimentos através da geração de faísca por meio de alta tensão. O detector é arrastado levemente sobre o revestimento e, ao encontrar uma descontinuidade no compósito, a faísca é gerada devido à exposição do metal. Um alarme sonoro é acionado no instante da detecção. Necessita de fonte de energia próxima ao local do ensaio e aterramento. É utilizado para baixas espessuras de até 7 mm e aplicado em revestimentos de dutos, tanques e vasos de pressão na indústria de óleo e gás [26] [27].

Figura 2.8 – Inspeção holiday detector. Figura 2.9 - Inspeção holiday detector.



[16].



[28].

2.4.5 Ultrassom

Esta técnica não destrutiva detecta discontinuidades internas através da aplicação e reflexão de ondas acústicas no material. Os pulsos ultrassônicos são ondas acústicas com frequências acima do limite audível. Normalmente, as frequências ultrassônicas situam-se na faixa de 0,5 a 25 MHz [22] [23].

Os pulsos são gerados e transmitidos através de transdutores especiais, encostados ou acoplados ao material. Os pulsos refletidos por uma discontinuidade, ou pela superfície oposta da peça, são captados pelo transdutor e convertidos em sinais elétricos [22].

Geralmente, as dimensões e localização reais de um defeito interno podem ser estimadas com uma razoável precisão. Utiliza-se ultrassom também para medir espessura e determinar corrosão com facilidade e precisão materiais metálicos [23].

As aplicações são inúmeras: soldas, laminados, forjados, fundidos, ferrosos e não ferrosos, ligas metálicas, vidro, borracha, materiais compósitos, etc. O ultrassom é utilizado na indústria automobilística, marítima, aeroespacial, petróleo e gás. É também utilizado na medicina para diagnósticos dos órgãos vitais e gestações [22].

Modernamente o ultrassom é utilizado na manutenção industrial, na detecção preventiva de vazamentos de líquidos ou gases e falhas operacionais em sistemas elétricos [22].

Essa técnica é recomendada para materiais isotrópicos, pois a reflexão da energia acontece na superfície limite entre dois materiais diferentes e é dependente da diferença de impedância acústica entre dois materiais.

Conhecendo-se a velocidade do ultrassom no material, a profundidade da falha pode ser estimada pela medida do intervalo de tempo de reflexão de pontos onde há falhas[4].

Além de ser pouco indicada para a realização de inspeção em materiais compósitos, devido à sua grande anisotropia, o método ultrassom realiza medições pontuais, tornando muito lenta a inspeção de grandes áreas [4].

2.4.6 Radiografia Industrial

O nome “radiação” se originou da propriedade que certas frequências de radiação eletromagnética possuem de atravessar materiais opacos à luz visível [4].

Dois tipos de radiação são usados em radiografia industrial: os Raios X e os Raios Gama. Eles se distinguem da luz visível por possuírem comprimentos de onda curtos, o que lhe dá a capacidade de atravessarem materiais que absorvem ou refletem a luz visível [4].

No âmbito dos ensaios não destrutivos, as propriedades da radiação são:

- Mesma velocidade de propagação da luz;
- Deslocam-se em linha reta;
- Não são afetadas por campos elétricos ou magnéticos;
- Podem atravessar materiais opacos à luz, e, ao fazê-lo, são parcialmente absorvidas por esses materiais.

Suas limitações estão na aplicação de inspeções em campo, Os equipamentos são de grandes dimensões, inviabilizando a inspeção em peças de geometrias complexas e de difícil acesso.

2.4.7 Tomografia Computadorizada

A Tomografia tem como base os mesmos princípios que a radiografia. É uma técnica muito utilizada para exames médicos na identificação de anormalidades no corpo humano. Porém, essa técnica também vem sendo aplicada na indústria para a verificação da qualidade e integridade dos materiais [23].

Durante o exame, a estrutura é atravessada pelos raios-X. Os elementos que formam a estrutura absorvem radiação e, dependendo de sua composição, sua radiação é mais ou menos absorvida.

Desse modo, a tomografia computadorizada indica a quantidade de radiação que foi absorvida e traduz essa variação em escala de cinza, produzindo uma imagem [4].

Na tomografia computadorizada, o material examinado deve ser deslocado no interior de um anel. Em torno deste anel há uma ampola de raios-X em um suporte circular. No lado oposto à ampola encontra-se o detector responsável por captar a radiação e transmitir essa informação para o computador ao qual está conectado [4].

Hoje em dia, as máquinas mais utilizadas são as sequenciais ou de terceira geração, nas quais, durante o exame, a ampola descreve uma volta completa de 360° em torno da estrutura, emitindo raios-X, que depois de atravessá-la, são captados na outra extremidade pelo detector. Outra configuração mantém o detector fixo e a peça é rotacionada. Um programa de computador especializado combina estas imagens, obtidas de diferentes ângulos, e reconstrói o volume tridimensional inspecionado.

Uma característica forte desta técnica é a sua versatilidade, servindo para avaliação de diferentes tipos de defeitos em diferentes tipos de materiais. Porém, ainda é uma técnica muito cara e de transporte complicado, por isso é quase impossível utilizá-la em campo [4].

2.4.8 Holografia

A holografia é uma técnica de registro e reconstrução de ondas luminosas, permitindo a formação de imagens em três dimensões. Desenvolvida por Dennis Gabor em 1948, só se tornou viável na década de 60 após o advento do laser [29] [30] [31].

Na década de 1960 surgiram as primeiras aplicações da holografia na engenharia. Ela foi usada para medir pequenos deslocamentos e deformações na superfície de objetos de interesse superpondo duas imagens tridimensionais do mesmo objeto, sendo uma antes e outra após a aplicação de um carregamento. A interferência óptica decorrente da superposição das duas imagens gera franjas de interferência claras (construtivas) e escuras (destrutivas) que estão relacionadas com os deslocamentos da superfície [32] [4].

Uma alternativa à holografia convencional, desenvolvida por Gabor, é a denominada “Holografia Eletrônica”, melhor denominada de interferometria *speckle* digital (DSPI ou ESPI).

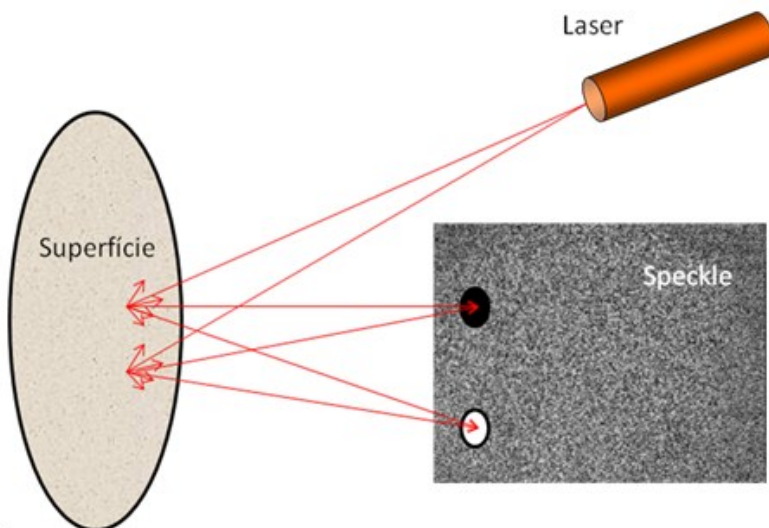
Ela também se presta para registrar com exatidão deslocamentos em superfícies em análise através de franjas de interferência permitindo a medição de deslocamento e identificação de anomalias no campo de deslocamentos sobre a área analisada [33].

Ao usar o laser como fonte de luz coerente iluminando a área em análise com comprimento de onda inferior à rugosidade da superfície gera-se um padrão estocástico de aparência granular resultante de interferências construtivas e destrutivas denominado “*speckle*”, que no Inglês significa “mancha” [4].

A Figura 2.10 exemplifica a iluminação da superfície em análise por uma fonte de luz coerente de laser. A frente de onda ao atingir a superfície rugosa sofre reflexão difusa e um padrão complexo de interferências luminosas, que podem resultar em pontos claros e escuros aleatoriamente distribuídos.

Quando obtido de forma apropriada este padrão contém informações de fase. Utilizando montagens ópticas, câmeras e programas de computador apropriados é possível medir digitalmente a fase de cada ponto da imagem e, a partir da variação de fase, caracterizar os deslocamentos da superfície em teste [4] [32].

Figura 2.10 – Formação do “*speckle*”.



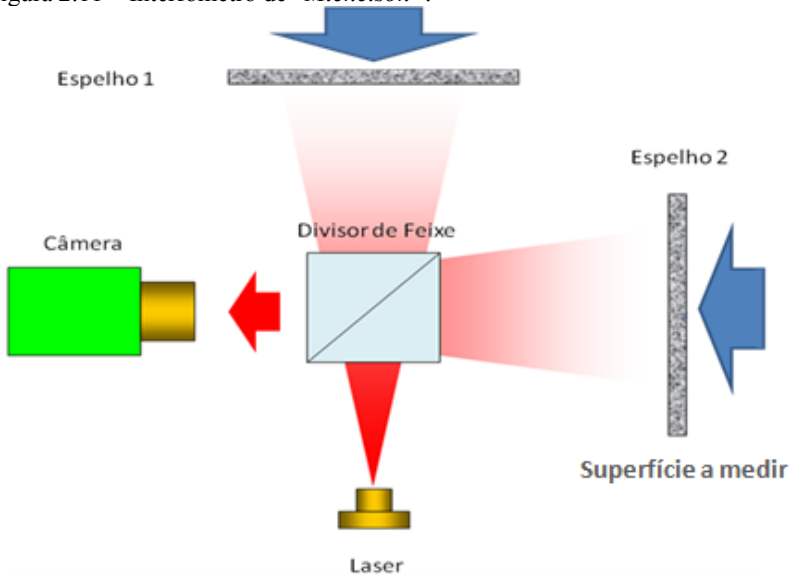
O tipo de montagem óptica mais utilizada é similar ao interferômetro de “*Michelson*”, que produz no sensor de uma câmera de vídeo a superposição do padrão de “*speckle*” da superfície da peça a medir com o de uma superfície de referência. O interferômetro de “*Michelson*” é ilustrado na Figura 2.11 [4].

O feixe de laser é dividido pelo cubo divisor de feixe e incide sobre a superfície a medir. Outra superfície – a superfície de referência - permanece imóvel. Ambas superfícies são rugosas e sua reflexão difusa gera *speckles*.

A câmera enxerga a superposição destes dois padrões de *speckle*. Através de um deslocamento da superfície a medir, varia-se a fase relativa entre as duas imagens superpostas. Assim, há uma variação da intensidade luminosa resultante ponto-a-ponto [32] [33].

A variação de fase é então provocada pela variação do caminho óptico percorrido por um dos feixes de luz graças ao deslocamento da superfície a medir, resultando na soma vetorial de cada onda. O sensor da câmera responde à intensidade de luz resultante da interferência percebida que depende diretamente da diferença de fase entre as duas ondas [32] [33].

Figura 2.11 – Interfêmetro de “*Michelson*”.



[34].

Para a medição com holografia, adquire-se a primeira imagem como referência. Após aplicar um carregamento na superfície em análise, adquire-se a segunda imagem. Calculando o quadrado da diferença entre as imagens é possível obter as franjas de interferência e, com elas, obter informações sobre o campo de deslocamentos da superfície [4] [32] [33].

Dois tipos básicos de configurações de iluminação são usados para a medição de deslocamento com holografia eletrônica. A iluminação simples, que é mais indicada para medir componentes do deslocamento fora do plano da superfície medida, e a iluminação dupla, que é mais apropriada para medir as componentes do deslocamento contidas no plano [4].

O uso da holografia eletrônica fora do ambiente laboratorial é muito difícil, pois sua elevada sensibilidade a torna suscetível a variações mínimas da posição do objeto e vibrações, o que pode inviabilizar o processo de medição. Em laboratório seu uso é facilitado pela utilização de equipamentos para isolar vibrações e interferências externas [4] [29] [30] [31].

2.4.9 Shearografia

Shearografia é uma tradução aqui adotada para o português para a técnica de medição conhecida em inglês como “*Shearography*”. É originária da junção das palavras “*shear*”, que significa “cisalhamento” ou “deslocamento lateral” e “*graphy*” que significa “registro”. É também conhecida como SPSI “*Speckle pattern Shearing Interferometry*” [1] [2] [4].

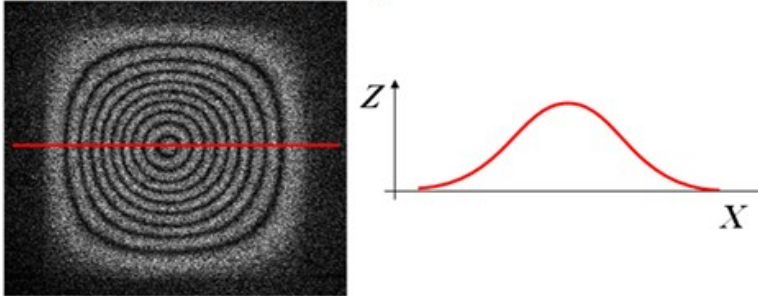
As técnicas de shearografia e holografia eletrônica possuem princípios ópticos similares, porém medem grandezas distintas. A holografia mede campos de deslocamentos. A shearografia mede primeiras derivadas do campo de deslocamento na direção coincidente com a do deslocamento lateral aplicado [4].

Se o campo de deslocamentos for constante em cada ponto do objeto, a primeira derivada do deslocamento será igual a zero, o que não produzirá franjas na medição com shearografia. Esta propriedade a torna praticamente insensível a movimentos de corpo rígido e permite sua aplicação fora de ambientes laboratoriais [4].

Tem-se os diferentes sinais de medição para o mesmo campo de deslocamentos quando medido com holografia eletrônica e com shearografia com deslocamento lateral horizontal.

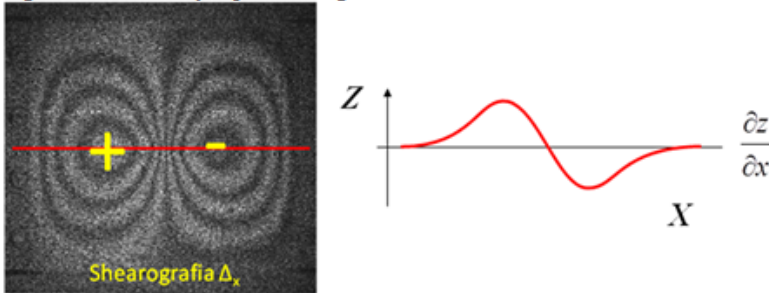
Na Figura 2.12 mostra-se o sinal de medição do deslocamento em “ z ” obtido com holografia eletrônica. Na Figura 2.13 mostra-se o sinal de medição da primeira derivada de “ z ”, obtido por shearografia. Com deslocamento lateral aplicado na direção “ x ”.

Figura 2.12 – Medição por holografia digital.



[4].

Figura 2.13 – Medição por shearografia.



[4].

A shearografia tem apresentado bons resultados para a detecção de falhas em materiais compósitos [35], principalmente na indústria aeroespacial e naval. Sua aplicação em campo é possível, pois é pouco sensível a deslocamentos de corpo rígido. O próximo capítulo trata em detalhes dos seus princípios, características e aplicações.

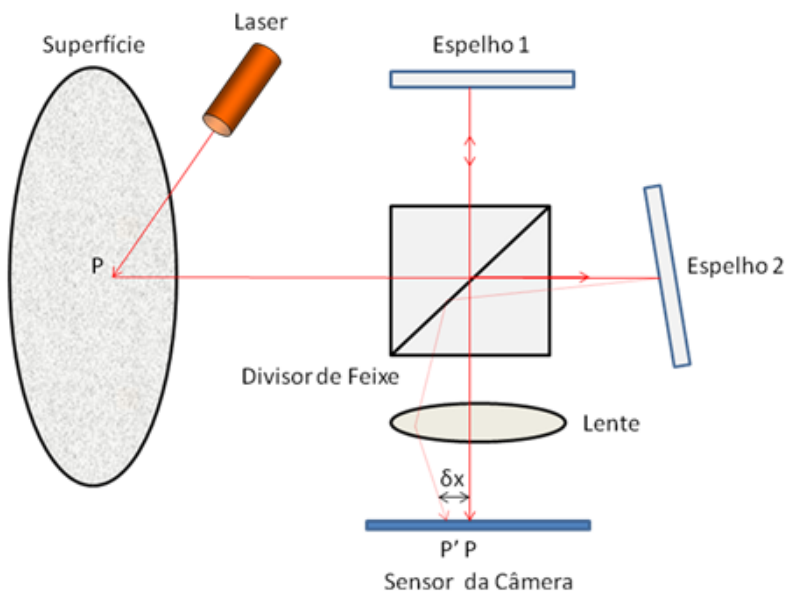
3 SHEAROGRAFIA

3.1 PRINCÍPIOS FUNDAMENTAIS

Como na holografia o sistema óptico utilizado pode ser inspirado no interferômetro de “*Michelson*”, que contém dois espelhos móveis e um divisor de feixe em seu centro. Porém, há uma diferença fundamental: a interferência é obtida entre a imagem original da superfície medida com outra imagem da mesma superfície, porém lateralmente deslocada. Na Figura 3.1 é possível visualizar um exemplo de configuração dos componentes ópticos seguindo o modelo de “*Michelson*”.

Para entender o seu funcionamento é necessário caracterizar os conceitos de diferença de fase e deslocamento de fase [1] [2].

Figura 3.1 – Configuração para shearografia inspirada no Interferômetro de “*Michelson*”.



3.1.1 Diferença de Fase

Considere a superfície na Figura 3.1 como um corpo de prova iluminado pela fonte de luz de laser incidindo com certa inclinação. A frente de onda refletida pela superfície difusa passa pelo interferômetro e, após, é captada pelo sensor de câmera e é processada por um computador, onde a intensidade do “*speckle*” é digitalizada [32].

Através do ponto P, representa-se o caminho óptico percorrido pelo feixe de luz do laser. O reflexo nesse ponto é captado pelo interferômetro onde a porção do feixe refletido pelo espelho 1 é conduzido para o sensor da câmera formando a imagem de P.

Quando o espelho 2 é ligeiramente inclinado, como mostra a parte direita da Figura 3.1, forma-se sobre o sensor da câmera uma segunda imagem do ponto P, denominada P' lateralmente deslocada “ δx ”. Multiplicando inúmeras vezes o caminho óptico de P, representa-se o caminho óptico (da superfície até o sensor da câmera) do reflexo da área iluminada pelo laser.

Dependendo do eixo de rotação do espelho inclinado, o deslocamento lateral pode ser realizado tanto na vertical, na horizontal, quanto na diagonal [36].

Após a inclinação do espelho, cada pixel do sensor de câmera passa a receber informação sobrepostas de dois pontos da superfície do objeto distantes “ δx ”. O conjunto desses pixels forma uma zona de interferência de duas regiões da superfície em medição distantes “ δx ”. Assim, estas duas regiões se sobrepõem no sensor da câmera, formando a zona de medição.

Esta interferência varia localmente de ponto para ponto, podendo ser de forma construtiva, destrutiva ou qualquer outra situação intermediária, em decorrência da diferença do caminho óptico percorrido por cada feixe [36] [37].

A intensidade resultante da interferência entre os dois pontos é influenciada pela diferença de fase entre eles. Se estes sofrem o mesmo deslocamento, a diferença de fase da interferência entre os feixes provenientes destes será a mesma, não havendo alteração de intensidade resultante. Se sofrerem deslocamentos diferentes, a diferença de fase entre os feixes será alterada e, conseqüentemente, a intensidade resultante.

É através das variações de fase que as anomalias são detectadas em shearografia. Entretanto, esta não pode ser medida diretamente. Sua medição indireta é feita a partir das variações da intensidade luminosa captada por cada pixel no sensor de câmera.

A relação entre a intensidade de um ponto na imagem dupla e a respectiva diferença de fase é dada pela Equação (3.1).

$$I = 2a^2[1 + \gamma \cos \varphi], \quad (3.1)$$

onde a é a amplitude luminosa que aqui é assumida ser igual para os dois pontos vizinhos; φ é a diferença de fase natural entre os “*speckles*” correspondentes aos pontos vizinhos que interferem e estão afastados de uma quantidade igual ao deslocamento lateral; e γ é a modulação para o termo de interferência [38] [39] [40].

Após a aplicação do carregamento a superfície do objeto se deforma, gerando alterações de fase na superfície. A diferença de fase entre dois pontos vizinhos que interferem podem se alterar e, neste caso, a intensidade resultante é dada pela Equação (3.2).

$$I' = 2a^2[1 + \gamma \cos(\varphi + \Delta\varphi)], \quad (3.2)$$

onde $\Delta\varphi$ representa a variação de fase entre os pontos vizinhos decorrente da deformação da superfície do objeto. Quando o quadrado da diferença entre as intensidades das imagens do estado não-deformado do objeto (estado de referência) e do estado após a aplicação do carregamento (estado deformado) é calculada ponto a ponto, será obtido zero para os pontos da imagem que mantém a mesma intensidade (pontos pretos) e resultará em números positivos quando a diferença for não nula (pontos mais claros). O efeito macroscópico é o surgimento de um padrão de franjas referente à deformação do objeto cuja intensidade em cada ponto é dada pela Equação (3.3) [38] [39] [40].

$$I_s^2 = (I - I')^2 = \left(4I_0 \left[\sin \left(\varphi + \frac{\Delta\varphi}{2} \right) \sin \frac{\Delta\varphi}{2} \right] \right)^2, \quad (3.3)$$

I_0 é a intensidade média ou de fundo, onde $a^2 = I_0$. Quando se trata de processamento de imagens, essa diferença é elevada ao quadrado. Assim, franjas escuras são visíveis nas regiões onde não há diferenças de fase entre os dois pontos ou quando a diferença de fase resultante corresponde a um múltiplo de 2π [4]. Franjas claras serão visíveis nos demais locais. Como o valor de intensidade depende de I_0 , γ e de φ , para se obter somente valores relativos à variação da fase $\Delta\varphi$ é necessária a aplicação de artifícios adicionais, como a técnica de deslocamento de fase [1] [2] [4].

3.1.2 Deslocamento de Fase

Para calcular a diferença de fase entre dois estados da superfície é necessário adquirir e combinar várias imagens com incrementos ou passos de fase bem definidos. Para aplicar incrementos de fase conhecidos é utilizado o segundo espelho do interferômetro, localizado na parte superior da Figura 3.1. Através de um atuador piezoelétrico (PZT), introduz-se, de maneira controlada um pequeno deslocamento paralelo do espelho produzindo variação uniforme do caminho óptico e a correspondente variação de fase constante em toda a imagem [36].

Quando o espelho é deslocado de uma quantidade δL , o comprimento do caminho óptico é alterado para $2\delta L$. A alteração de fase é calculada pela Equação (3.4) [36].

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot 2 \delta L \quad (3.4)$$

Existem diversas formulações para o cálculo da fase. Neste trabalho é utilizada a formulação de “*Hariharan*” de cinco passos. O método consiste, basicamente, na aquisição de cinco imagens defasadas entre si de noventa graus (90°). Para cada ponto da imagem a intensidade é adquirida, conforme as seguintes equações [41] [42]:

$$\begin{aligned} I_1 &= 2I_0 \cdot [1 + \gamma \cos(\varphi - 180^\circ)] \\ I_2 &= 2I_0 \cdot [1 + \gamma \cos(\varphi - 90^\circ)] \\ I_3 &= 2I_0 \cdot [1 + \gamma \cos(\varphi)] \\ I_4 &= 2I_0 \cdot [1 + \gamma \cos(\varphi + 90^\circ)] \\ I_5 &= 2I_0 \cdot [1 + \gamma \cos(\varphi + 180^\circ)] \end{aligned} \quad (3.5)$$

Onde:

I_0 é o valor de intensidade de fundo do ponto considerado;

γ é a modulação do termo de interferência do ponto considerado;

φ é o valor da fase do ponto considerado.

Após a resolução do sistema de equações, o valor da fase do ponto considerado da imagem é determinado pela Equação (3.6) [36].

$$\varphi = \arctan \frac{2(I_2 - I_4)}{-I_1 + 2I_3 - I_5} \quad (3.6)$$

De acordo com os sinais do numerador e do denominador da Equação 3.6, consegue-se determinar os valores da fase entre $-\pi$ e $+\pi$, mas não além deste limite. Como o valor da fase real geralmente ultrapassa os limites de $-\pi$ e $+\pi$ (2π), a Equação 3.6 não resolve totalmente o problema, pois resulta nos valores cômputos dos ângulos correspondentes à primeira volta apenas. Quando a fase aumenta progressivamente, toda a vez que o ângulo de fase completa uma volta há um “salto” de 2π (360°) no valor calculado da fase [41].

A determinação do valor completo da fase é feita através de um algoritmo de remoção do salto de fase, que não será discutido neste trabalho [4]. Quando o conjunto de valores de diferença de fase é calculado e representado para todos os pixels de uma imagem forma-se o denominado mapa da diferença de fases [41].

Ao ser representado em imagens monocromáticas com 8 bits de resolução, que apresentam 256 níveis de cinza, adota-se uma escala em que 256 níveis de cinza correspondem a 2π rad. Assim, se o valor da diferença de fase for 0, o pixel será visualizado na cor preta [4]. Valores intermediários de diferença de fase serão representados nos vários tons de cinza restantes. Se o ângulo de diferença de fase for próximo a 2π , será representado pela cor branca.

O mapa de fases de uma superfície contendo “*speckle*”, como, por exemplo, o da condição inicial, apresenta composição tipicamente aleatória, sem um padrão visual que caracterize franjas [4]. Por outro lado, a imagem resultante da diferença dos mapas de fases do estado inicial (φ) e carregado (φ') é denominada de “Mapa da Diferença de Fases” ($\Delta\varphi$). Este apresenta um padrão visual que corresponde às franjas de interferência [4] [36] [40] [41].

3.1.3 Processamento das Imagens

Para adquirir as imagens, calcular da diferença de fase, aplicar o deslocamento de fase e processar os dados foi desenvolvida a Shearografia Eletrônica ou “*Electronic Speckle Pattern Shearing Interferometry*” (ESPSI). Na shearografia eletrônica, as imagens são adquiridas digitalmente pelo sensor da câmera e processadas em um computador por um software específico [31] [33].

O software implementa dois modos de observar as figuras de interferência: (a) “Franjas ao vivo” e (b) mapas das diferenças de fase.

No modo “Franjas ao vivo” o quadrado da diferença das intensidades entre a imagem de referência e a atual é visualizado em quase tempo real, limitado pela taxa de aquisição da câmera e pelo tempo de processamento.

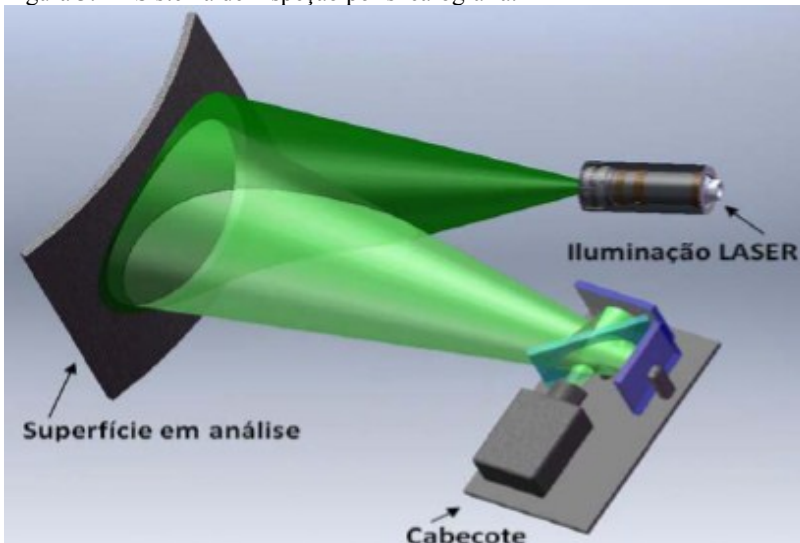
Ele permite uma rápida visualização das franjas e anomalias, porém com qualidade de imagem limitada, sendo geralmente usado apenas para avaliações somente qualitativas [4] [36].

O modo que mostra o mapa das diferenças de fase apresenta qualidade de imagem muito superior, porém é uma forma mais lenta e para realizá-la é necessário aplicar o deslocamento de fase. Esta técnica permite uma análise qualitativa e quantitativa do objeto medido [4].

3.2 EQUIPAMENTO CLÁSSICO

O sistema de inspeção por shearografia pode ser dividido em três módulos: (a) o módulo de iluminação, (b) módulo de formação da imagem (cabeçote) e (c) módulo de carregamento como visto na Figura 3.2. Ainda é necessário um sistema de suporte e fixação de todos estes módulos e um módulo de comando, processamento e armazenamento de dados, normalmente composto de um computador com um módulo de aquisição de dados.

Figura 3.2 – Sistema de inspeção por shearografia.



[2].

O módulo de iluminação é composto por uma fonte de luz laser e óptica de expansão para iluminar a superfície em análise. O módulo de formação de imagens contém um interferômetro e uma câmera para captar as imagens.

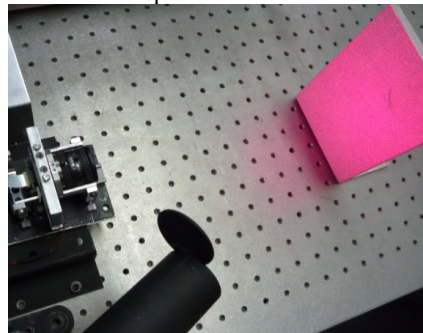
As Figuras 3.3 e 3.4 mostram imagens obtidas com os dois tipos de iluminação utilizados no trabalho: (a) uma fonte de luz de laser de 400 mW com λ de 532 nm (verde) e (b) uma fonte de luz de laser diodo de 50 mW com λ de 660 nm (vermelho). Embora o laser de 400 mW não caracterize um laser de alta potência, ele tem sido referido neste texto como sendo de alta potência para diferenciá-lo do outro (50 mW), aqui referido como laser de baixa potência.

O módulo de formação da imagem pode seguir diferentes configurações. As Figuras 3.5 e 3.6 mostram a configuração clássica inspirada no interferômetro de “*Michelson*” e uma configuração alternativa em desenvolvimento pelo Labmetro que será apresentada na seção 4.3.2.

Figura 3.3 – Superfície iluminada por laser alta potência.



Figura 3.4 – Superfície iluminada por laser de baixa potência.



O módulo de carregamento é o sistema que aplica o estímulo na superfície a medir e provoca sua deformação. O sistema depende do tipo de carregamento utilizado (os tipos de carregamento serão abordados no próximo tópico). Na Figura 3.7 é possível visualizar o sistema como um todo: os módulos de iluminação, de formação de imagem na forma do cabeçote de inspeção e ainda os sistemas de aquisição de dados e computador para controle.

Figura 3.5 – Cabeçote original.

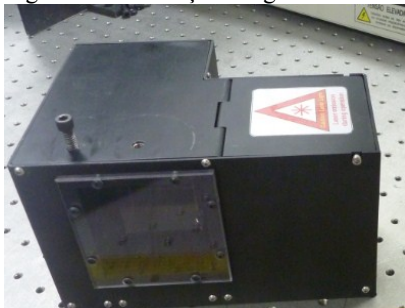


Figura 3.6 – Cabeçote alternativo.

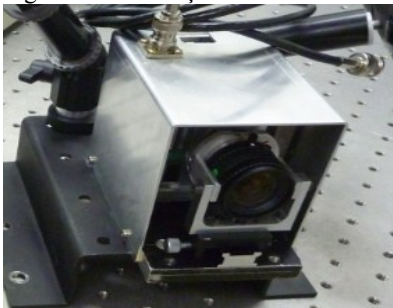
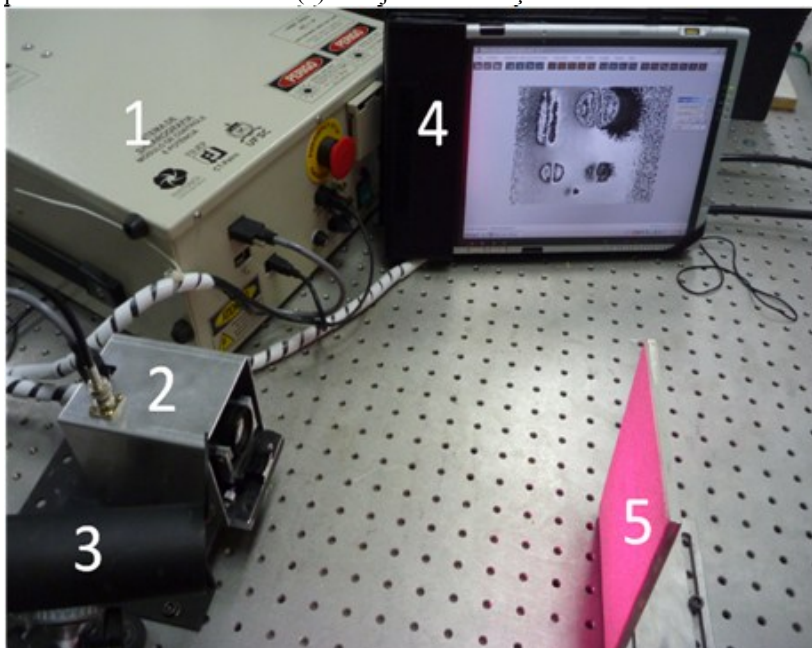


Figura 3.7 – Sistema de inspeção por shearografia, (1) – Módulo de aquisição de dados, (2) – Módulo de formação de imagens, (3) – Laser, (4) – Computador; processamento e comando e (5) – Objeto em medição.



3.3 TÉCNICAS DE CARREGAMENTO

A detecção de falhas em materiais compósitos através da shearografia pode requerer a aplicação de um ou mais formas de carregamentos sobre o elemento inspecionado. Idealmente, o carregamento não deve ser invasivo e nem causar danos no elemento inspecionado.

Alguns aspectos são levados em conta para a seleção da melhor forma de carregamento, como a estrutura do objeto inspecionado, o tipo de material e o tipo de defeito esperado. Como não há uma fórmula única para definir o melhor, é comum experimentar diferentes tipos de carregamentos de forma separada ou conjugada e, por comparação e complementação, selecionar o caminho mais adequado e extrair informações mais detalhadas sobre o material analisado.

Os tipos de carregamento se dividem em duas principais classes:

- Carregamentos estáticos, ou quase estáticos.

- Carregamentos Mecânicos

- Flexão
 - Torção
 - Compressão
 - Pressão Interna

- Carregamento Térmico

- Carregamento por Vácuo

- Carregamentos Dinâmicos.

- Vibrações harmônicas

Alguns carregamentos são mais indicados para certas classes de aplicações, envolvendo diferentes tipos de defeitos e materiais. Apresenta-se a seguir uma breve descrição dos principais carregamentos utilizados e sua aplicabilidade.

3.3.1 Carregamento Mecânico

Os carregamentos mecânicos estáticos ou quase estáticos são realizados com o auxílio de um agente externo que pode aplicar níveis controlados e estáveis de tração, flexão, torção ou, quando for o caso, variação da pressão interna. São considerados estáticos relativamente em relação aos carregamentos dinâmicos, porém são ditos quase estáticos, pois, em alguns casos, é difícil manter o nível do carregamento completamente estável [4].

Uns dos critérios para escolha do carregamento ideal é a presença de campos de deformações detectáveis ao longo do material influenciados pela presença dos defeitos. Assim de acordo com o tipo de estrutura analisada ou do tipo de anomalias a distribuição de deformação em toda a peça normalmente tem respostas distintas para cada carregamento.

No caso de estruturas de núcleo vazado como tubos de aço com revestimentos compósitos ou tubos e vasos de pressão completamente constituídos de materiais compósitos, o tipo de carregamento mais adequado é frequentemente a variação da pressão interna [3].

Este tipo de carregamento exerce uma força radial bem distribuída ao longo do tubo e suas junções, possibilitando a geração de campos de deformações uniformes no material na ausência de defeitos. Quando defeitos estão presentes, surgem anomalias no campo de deformações que refletem nos mapas de franjas gerados [3].

A variação de pressão interna é mais indicada para a detecção de defeitos como descolamentos, delaminações, falhas de impacto ou quando há descolamento e não rompimento da fibra, denominado na literatura como “*bridging*” em tubulações ou vasos de pressão [8] [35]. Para detecção de trincas são recomendados carregamentos de tração, flexão ou torção onde a aplicação da tensão deve ser perpendicular à direção da trinca. Estes tipos de carregamentos podem ser aplicados em chapas metálicas, chapas compósitas, laminados, peças de grande porte e geometria simples, dutos e tubulações.

3.3.2 Carregamento Térmico

Graças à dilatação térmica dos materiais, este tipo de carregamento gera no material inspecionado campos de deformações ao longo de todo corpo. Como cada constituinte do material, e dos eventuais defeitos, têm seu próprio coeficiente de dilatação e condução térmica, quando sujeitos a taxas de transferência de energia térmica, se comportam de forma diferente [4] [25].

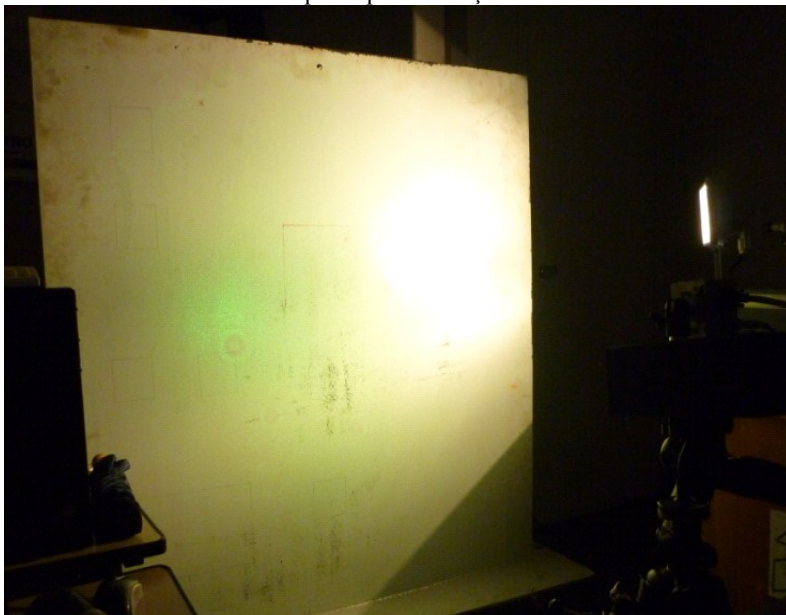
Defeitos como bolhas de ar, descolamentos entre camadas e corpos estranhos são identificados devido à dilatação térmica diferencial. Por exemplo, em materiais compósitos com defeitos de bolhas de ar e delaminações, quando sujeito às taxas térmicas, o ar dentro do defeito, por ser mais isolante impede o fluxo de calor. Com esse comportamento, eleva-se a temperatura e gera-se maior dilatação na

região do material e ao seu redor, provocando assim, descontinuidades locais nos campos de deformações [4] [25].

O mesmo acontece com outros tipos de defeitos, a dilatação diferencial entre o defeito e o material gera os campos de deformações descontínuos, com isso as deformações são diferentes do restante da peça, sendo assim identificados pela shearografia [4].

O aquecimento normalmente é feito (a) por radiação, com auxílio de uma lâmpada ou laser infravermelho de alta potência, microondas, ou (b) com a utilização de um soprador de ar quente. O carregamento térmico é de fácil aplicação, inclusive em superfícies irregulares [4]. Um exemplo do carregamento térmico pode ser visto na Figura 3.8.

Figura 3.8 – Carregamento térmico provocado por uma lâmpada de halogênio de 500 W incidindo sobre corpo de prova de aço.



Frequentemente a medição com shearografia é realizada após o aquecimento, durante o resfriamento do elemento inspecionado. Entretanto, o decaimento de temperatura pode ser muito rápido e isso exige que um sistema de aquisição e processamento de imagens seja rápido. Na falta deste, pode ser impossível a detecção de uma falha em

função do baixo contraste das franjas que é característico quando a superfície está em movimento durante a aquisição das imagens [4].

Para a identificação das falhas com carregamento térmico são utilizados mapas de diferenças de fase. Normalmente, adquire-se o mapa de fase de referência antes de iniciar o resfriamento e logo após o término do aquecimento. Como a peça está resfriando sua deformação é progressivamente alterada, dificultando o processamento e interpretação das imagens geradas [4].

Para atenuar esta influência do comportamento dinâmico no carregamento térmico a técnica de carregamento pulsado pode ser usada para extrair resultados com melhores contrastes da franjas. O aquecimento é realizado periodicamente em um número alto de repetições.

Ao analisar todos resultados extraídos via aplicação da transformada de “*Fourier*” a relação sinal ruído é melhorada, facilitando assim a interpretação das imagens geradas [43].

A duração do carregamento térmico é também um fator importante, o mesmo pode variar de 3 a 60 s dependendo do material.

3.3.3 Vácuo

Quando o material é sujeito a uma condição de vácuo e esse possui alguma falha de adesão que contenha uma bolha de ar, a ação do vácuo tende a expandir essa falha, pois a bolha de ar formada entre as camadas aumenta de volume. Esse comportamento da bolha de ar desloca as camadas, alterando o campo de deformações na superfície do material [4].

É um ensaio de fácil repetição e promove um bom contraste de franjas nas imagens geradas. Tem boa aplicabilidade em peças longas de materiais compósitos de baixa complexidade geométrica [4] [35].

Por exigir o uso de câmeras de vácuo, este tipo de carregamento pode trazer algumas dificuldades, dependendo do caso. Câmeras pequenas são de fácil locomoção, mas têm por principal restrição a pequena área de inspeção. No caso de câmeras de grande porte, onde o propósito é aplicar o carregamento em grandes áreas, ou toda peça de uma vez, o manuseio se torna mais difícil e o custo de fabricação e execução do mesmo pode se tornar elevado [35].

3.3.4 Carregamento Dinâmico

O carregamento dinâmico mais utilizado é por vibração harmônica na frequência de ressonância. A vibração harmônica é um movimento oscilatório periódico de um elemento em torno de uma configuração de referência [4]. O número de vezes que o ciclo do movimento é completado durante um período é denominada por frequência, medida em Hertz (Hz).

Quando um objeto oscila na sua frequência natural, ou em suas harmônicas, dá-se o nome de Ressonância. É nesta condição que o objeto vibra com a máxima amplitude para a mesma energia de excitação, limitada apenas pelos agentes amortecedores [4] [44].

Cada objeto apresenta mais de uma frequência de ressonância. A frequência mais baixa é denominada de frequência fundamental. As frequências de ressonância mais elevadas são as suas harmônicas. Cada frequência de ressonância corresponde um modo de vibração [44].

Alguns defeitos em materiais compósitos podem ser detectados através de carregamento vibracional. Os defeitos geralmente são descolamentos entre camadas de uma região da peça, e este tende a se comportar como uma espécie de membrana quando aplicado a excitação. Se esta membrana é excitada em sua frequência de ressonância sua vibração deverá ser intensa e distinta da região vizinha ao ponto de ser identificada pelo sistema de inspeção [4].

Essa excitação pode ser feita por percussão através da utilização de atuadores piezoelétricos ou sonicamente através de alto-falantes, que, através de sua potência, produzam deslocamentos e frequências capazes de excitar o objeto em análise [4].

Cada material, e forma estrutural do objeto, exigirão uma atuação diferente, com diferentes frequências e amplitudes. Para encontrar a frequência de ressonância de um defeito é comum realizar uma varredura sobre a superfície do objeto com diferentes frequências. Através de uma análise visual em tempo real, é possível identificar frequências onde o número de franjas passa por máximos localizados, correlacionando assim a frequência com a identificação do defeito.

Para estas análises é possível utilizar diferentes formas de iluminações por laser. A iluminação contínua é mais utilizada para medições qualitativas; a iluminação estroboscópica é utilizada para medições quantitativas, além de ser o método mais complexo e caro [4].





























O carregamento dinâmico vem apresentando bons resultados em análises quantitativas em materiais compósitos com o propósito de identificar a profundidade de defeitos nos mesmos [4].

Peças e revestimentos de materiais compósitos com geometrias simples podem ser examinados com esse tipo de carregamento.

3.3.5 Tabela dos Tipos de Carregamentos

A Tabela 3.1 apresenta uma relação entre os quatro tipos de carregamento aplicáveis com shearografia e os defeitos mais comuns em materiais compósitos. São três classificações: bom, regular e ruim.

Tabela 3.1 – Principais tipos de carregamentos e sua aplicabilidade para detecção de defeitos.

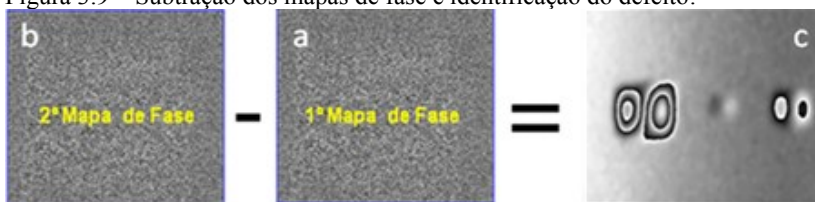
	Térmico	Mecânico	Vácuo	Dinâmico
Delaminação				
Descolamento				
Impacto				
Inclusão				
“Bridging”				
Fabricação				
Bolhas				

[35].

3.4 INTERPRETAÇÃO DAS IMAGENS

Como já explicado na seção 3.1.3, o processamento de imagens segue os seguintes passos: (a) aquisição de uma sequência de cinco imagens defasadas de 90° e cálculo do mapa de fase da superfície a medir antes do carregamento; (b) aquisição de uma sequência de cinco imagens defasadas de 90° e cálculo do segundo mapa de fase após o carregamento externo e (c) subtração dos mapas de fase dando origem ao mapa de diferença de fases obtendo assim uma imagem que revela a região defeituosa, como a vista na Figura 3.9.

Figura 3.9 – Subtração dos mapas de fase e identificação do defeito.



[4].

Utilizando os recursos de softwares é possível tratar os dados expostos na imagem final para assim facilitar a interpretação e identificação dos defeitos subsuperficiais. Ao utilizar o fator de escala apropriado é possível quantificar o tamanho do defeito: seleciona-se a área do defeito e calcula-se o tamanho em milímetros da área selecionada na imagem, como visto na Figura 3.10.

Após a seleção do defeito realiza-se localmente a remoção do salto de fase onde a imagem da anomalia é reconstruída reescalando as franjas e seu contraste em tons de cinza.

Como a shearografia é uma técnica que mede a primeira derivada do deslocamento na direção em que é aplicado o deslocamento lateral, seja ele horizontal, vertical ou diagonal, ao calcular a integral desta derivada é possível obter a componente fora do plano do deslocamento e, com ela, uma representação tridimensional do defeito identificado.

Ao inspecionar superfícies mais complexas é comum realizar deslocamento lateral da imagem em diferentes direções e analisá-las em conjunto. É possível obter distintas identificações que reforcem a existência do defeito, como visto nas Figuras 3.11 e 3.12 de uma inspeção realizada em uma junta de um duto submetido à variação de pressão interna.

As setas indicam o sentido do deslocamento lateral da imagem.

Figura 3.10 – Seleção da área do defeito na imagem.

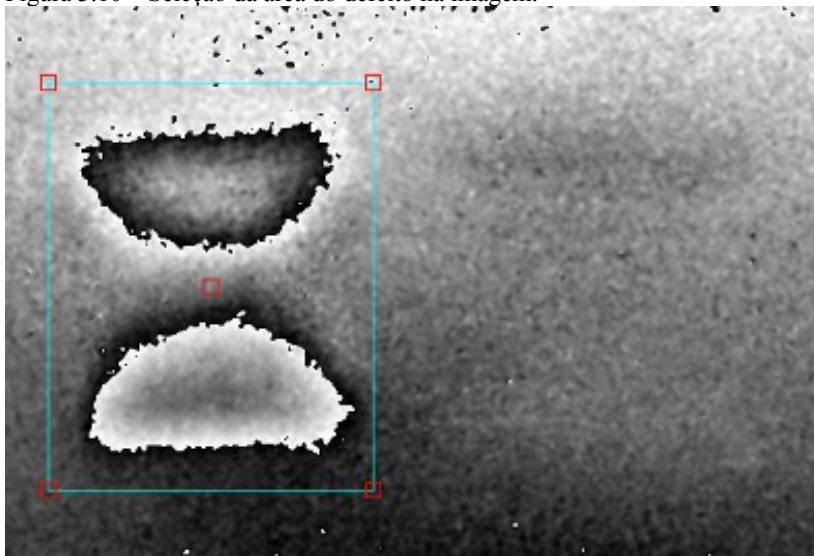
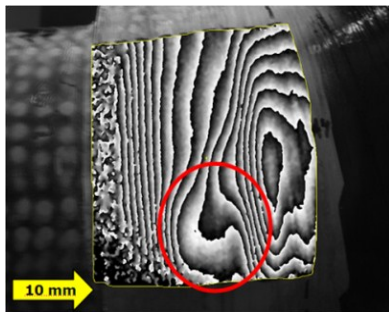
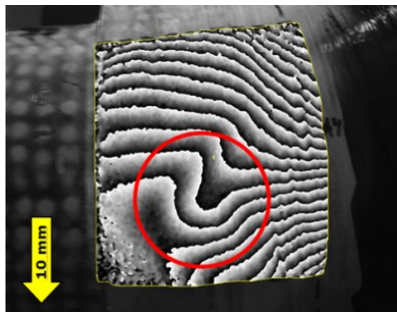


Figura 3.11 – Deslocamento lateral horizontal.



[2].

Figura 3.12 – Deslocamento lateral vertical.



[2].

4 SISTEMA DE SHEAROGRAFIA PARA GRANDES ÁREAS

Os sistemas de shearografia utilizados no Labmetro até então foram projetados para inspeção de áreas relativamente pequenas, com dimensões não maiores que 300 x 300 mm². Como tanques de armazenamento de petróleo e derivados têm dimensões largamente superiores àquelas atualmente encontradas em dutos e juntas ponta e bolsa, foi necessário um novo projeto do sistema a fim de aumentar seu campo de visão para aproximadamente 1 m².

Este capítulo abordará primeiramente os tanques de forma a contextualizar a aplicação da shearografia na inspeção de revestimentos aplicados a estas estruturas. Em seguida serão abordados os requisitos básicos de projeto e as modificações realizadas em cada módulo do sistema de inspeção por shearografia.

4.1 TANQUES

Segundo a norma API 650, os tanques de armazenamento de petróleo podem ter dimensões que chegam em torno de 100 metros de diâmetro e alturas que chegam em torno de 20 metros. Os tanques podem ser de diversos tipos: tanques de teto flutuante, tanques de teto fixo, tanques subterrâneos, esféricos, entre outros.

Os tanques são construídos a partir de chapas calandradas soldadas de diversos tipos de aços, ASTM A 36, ASTM A 131, ASTM A 283, ASTM A 285, além de outros tipos de aços utilizados de acordo com sua aplicação e espessura necessária para compor a estrutura do tanque [17].

A estrutura do tanque é composta por anéis de chapas soldadas, cujas chapas podem ter dimensões de 1500 mm a 2440 mm por 6000 mm até 12000 mm, e espessura de 4,75 até 50,4 mm. Um tanque pode ter oito anéis compondo uma altura aproximada de 20 metros. Quanto mais superior a posição do anel, menor deverá ser a espessura da chapa. Por exemplo, um tanque de seis anéis, tem o anel base de 38,1 mm de espessura e o sexto anel com 9,5 mm [45] [46] [47].

As dimensões estruturais do tanque são determinados pelos métodos “ponto variável” e “1 ft” ambos explicados em [17].

Os tanques podem ser revestidos internamente por materiais compósitos ou tintas para proteção contra a corrosão. Alguns podem ser completamente revestidos segundo [48] [49] ou podem ter somente o primeiro anel e o fundo revestido por material compósito para evitar

corrosão proveniente de água decantada acumulada em fundo de tanque [12] [17].

Os defeitos mais comuns encontrados nos revestimentos são as delaminações. Estas podem surgir em função da falta de adesão entre o revestimento e o aço. A falta de adesão pode ser ocasionada pela má aplicação do revestimento ou por geração de micro-fissuras ao longo do tempo de uso, onde o fluido pode se infiltrar ocasionando um descolamento entre os mesmos.

Por isso deve se checar a adesão do revestimento ao aço logo após a sua aplicação e com certa periodicidade ao longo do tempo de uso.

4.2 REQUISITOS

Os requisitos básicos de projeto do novo sistema são:

- Módulo de formação da imagem:
 - Campo de visão abrangendo aproximadamente 1 m², boa resolução e qualidade de imagem em altas taxas de aquisição com capacidade de detecção de defeitos de maior dimensão.
- Módulo de iluminação:
 - Maior densidade de potência e ampliação da área iluminada para 1 m². Boa distribuição de iluminação ao longo da área de inspeção. Laser de alto comprimento de coerência e estável.
- Módulo de carregamento:
 - Módulo de fácil aplicação, comando e de fácil mobilidade.
- Módulo de Suporte e Fixação:
 - Capacidade de suporte de carga em superfícies características de resina com PRFV de aproximadamente de 5 kg.

4.3 MÓDULO DE FORMAÇÃO DE IMAGEM DE SHEAROGRAFIA PARA GRANDES ÁREAS

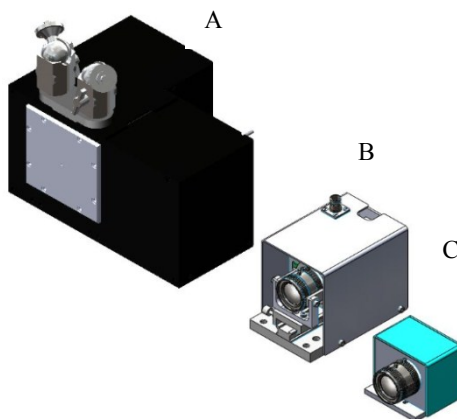
Os módulos de formação da imagem dos sistemas de shearografia disponíveis no Labmetro até o início deste trabalho pesam na ordem de 3 a 4 kg, com dimensões de (200 x 155 x 116) mm e campo de visão na ordem de 200 x 270 mm² a uma distância de 450 mm do corpo de prova.

Para a inspeção de grandes áreas, uma nova concepção de todo módulo foi desenvolvida. O projeto buscou um novo leiaute dos componentes ópticos dentro do módulo para assim obter: menor massa e volume, manter a qualidade de inspeção e aumentar o campo de visão para 1 m² com o módulo de formação da imagem posicionado a 1 m de distância da estrutura a ser analisada. Um novo componente óptico foi adicionado.

O desenvolvimento foi progressivo. Inicialmente foi realizado um estudo comparativo dentre os componentes ópticos disponíveis no laboratório para determinar o conjunto com melhor campo de visão. Em seguida, de acordo com os resultados obtidos por [50], foi desenvolvido um protótipo de avaliação com grade de difração.

Após validado o conceito, o mesmo protótipo foi usado para otimização do leiaute do próprio sistema, avaliando-se os parâmetros, campo de visão, deslocamento lateral e qualidade de imagem. A evolução do sistema é apresentada na Figura 4.1.

Figura 4.1 – Evolução dos Módulos de Formação da Imagem - (A) Módulo de formação de imagem com Interferômetro de Michelson (B) Protótipo de avaliação da grade difrativa, (C) Módulo difrativo



4.3.1 Módulo de Formação de Imagens com Interferômetro de Michelson (MIM)

O MIM tem as seguintes características:

- Massa: 3,17 kg
- Dimensões: 213 mm x 155 mm x 116 mm

- Campo de Visão: 200 mm x 270 mm,
- Distância de trabalho: 450 mm
- Componentes:
 - Câmera: Point grey, Flea2 14S3M/C, CCD 1/2"
 - Divisor de Feixe: Amplitude, 50%
 - PZT: Piezomechanik, Str35, 6 μ m, 150 V
 - Lente Objetiva: Computar, foco = 12 mm

4.3.2 Protótipo de Avaliação da Grade Difractiva

No lugar do interferômetro de Michelson foi utilizada uma grade de difração com a mesma função de gerar a imagem dupla. Para isso foi necessário um novo leiaute dos componentes ópticos do módulo. A princípio, a imagem gerada pela grade possui deslocamento lateral fixo. Porém afastando-se ou aproximando-se a grade do sensor da câmera é possível regular, aumentar ou diminuir, respectivamente, o deslocamento lateral.

A grade de difração foi disposta entre o sensor da câmera CCD e a lente objetiva. Com isso, torna-se possível a regulagem do foco da imagem.

Na lateral da grade foi conectado o atuador piezelétrico com o propósito de deslocá-la transversalmente e assim aplicar o deslocamento de fase entre os feixes em interferência. O conceito óptico envolvido neste novo leiaute foi validado e experimentado por [50].

Antes do início do projeto do protótipo difractivo, foram realizados diferentes estudos comparativos entre as câmeras e lentes disponíveis no LABMETRO para análise do campo de visão em função da distância do protótipo ao corpo de prova.

Nos testes foram utilizadas combinações dos seguintes sensores CCD e lentes objetivas:

- CCD Dragonfly Sony 1/3",
- CCD Grasshopper Sony 2/3", GRAS-14S5M/C, Point Grey
- CCD Sony 1/2" Flea 2 modelo 15SM3, Point Grey,

Com as seguintes lentes objetiva:

- Lente Computar M0814-MP, $f=8$ mm, F1.4 para 2/3".
- Lente Tamrom, modelo 23FM25, 2/3 $f=25$ mm F 1.6.

Os campos de visão obtidos para doze configurações estão resumidos na Tabela 4.1.

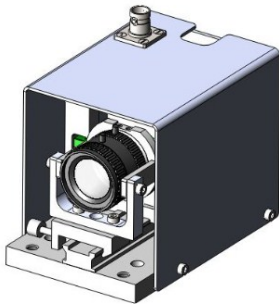
Tabela 4.1 – Campos de visão.

Ensaio	Lente	CCD	Distancia Cp	Campo de Visão	Área do Campo mm ²
1	f8 mm	Dragonfly 1/3"	280 mm	(125Vx160H) mm ²	20000
			1 m	(430Vx550H) mm ²	236500
2	f8 mm	Grasshopper 2/3"	280 mm	(210Vx270H) mm ²	56700
			1 m	(740Vx980H) mm ²	725200
3	f8 mm	Pointgrey 1/2"	280 mm	(170Vx210H) mm ²	35700
			1 m	(540Vx710H) mm ²	383400
4	f25 mm	Dragonfly 1/3"	280 mm	(42Vx52H) mm ²	2184
			1 m	(140Vx175H) mm ²	24500
5	f25 mm	Grasshopper 2/3"	280 mm	(66Vx92H) mm ²	6072
			1 m	(230Vx310H) mm ²	71300
6	f25 mm	Pointgrey 1/2"	280 mm	(52Vx66H) mm ²	3432
			1 m	(165Vx235H) mm ²	38775

A combinação que apresentou maior campo de visão foi a número 2: câmera *Grasshopper* e lente f8 mm apresentando 0,72 m² para uma distância de 1 m entre o módulo e o corpo de prova. O conjunto 3 foi escolhido para compor o projeto do protótipo por apresentar dimensões mecânicas mais compactas.

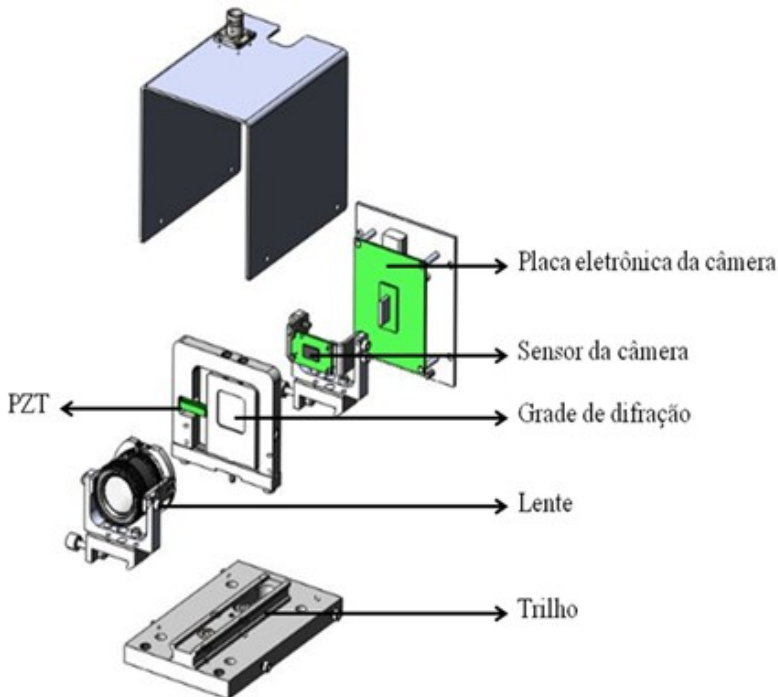
Na Figura 4.2 mostra-se uma vista em perspectiva do protótipo de avaliação.

Figura 4.2 – Vista em perspectiva do módulo de avaliação.



Na Figura 4.3 mostra-se uma vista explodida do leiaute dos componentes ópticos.

Figura 4.3 – Vista explodida do layout dos componentes ópticos.

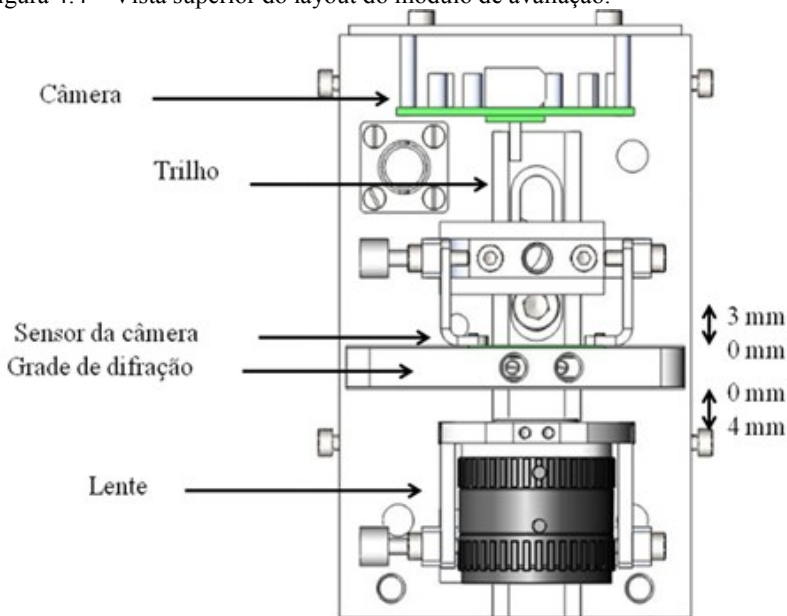


Ambos os componentes, sensor e lente têm regulagem ao longo do eixo óptico sobre um trilho. Desta maneira, é possível modificar as distâncias relativas entre CCD, lente objetiva e grade de difração. O curso máximo permitido entre a lente e grade de difração sobre o trilho é de 4 mm. Já a posição entre o sensor da câmera e a grade pode ser de 0 a 3 mm.

A distância entre a superfície da grade de difração e da borda do suporte é aproximadamente 1 mm, ou seja, além do curso do trilho conta-se 1 mm a mais entre o componente analisado e a grade de difração.

A Figura 4.4 apresenta uma vista superior do leiaute dos componentes ópticos e distâncias do protótipo de avaliação.

Figura 4.4 – Vista superior do layout do módulo de avaliação.



A partir desse layout foi possível realizar estudos comparativos dos componentes ópticos disponíveis, conforme descrição contida no tópico 4.3.4.

4.3.3 Rede de Difração

Uma grade de difração clássica é formada por um substrato que contém uma estrutura periódica de fendas ou estruturas de fase com propósito de gerar difração na frente de onda luminosa que a atravessa [32].

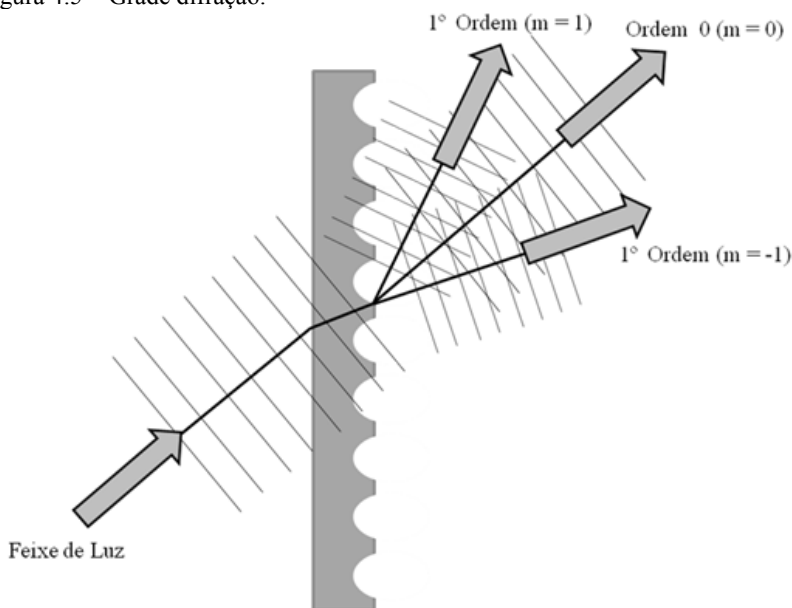
Ao atravessar uma grade de difração a luz é espalhada por difração em várias componentes denominadas ordens e sofre interferência em diferentes ordens. A ordem zero corresponde à parcela da luz que não sofre difração e mantém sua direção de propagação inalterada. As demais parcelas mudam sua direção de propagação em um ângulo θ calculado pela Equação (4.1).

$$\sin \theta = m\lambda/d, \quad (4.1)$$

sendo λ o comprimento de onda da luz, d o período da grade de difração e m a ordem de difração.

A primeira ordem de difração tem duas componentes ($m = +1$ e $m = -1$), que formam ângulos simétricos em relação à ordem zero, da forma representada na Figura 4.5. As ordens de difração mais elevadas formam ângulos cada vez maiores com a direção da ordem zero, mas contém cada vez menos energia e, por isso, não serão aqui tratadas. Quanto maior for o número de fendas por unidade de comprimento maior será o ângulo do feixe difratado [32].

Figura 4.5 – Grade difração.



[32].

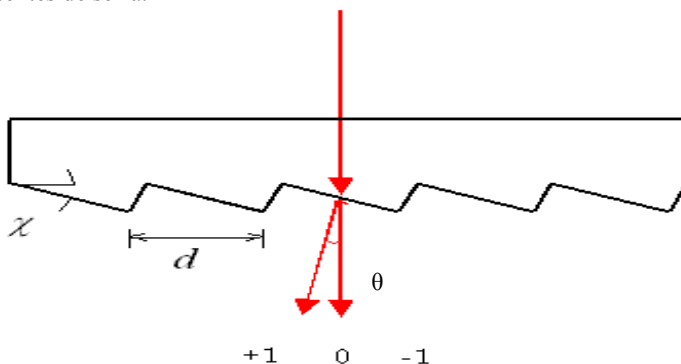
Ao se antepor uma grade de difração clássica entre a lente objetiva e o sensor da câmera seria formada uma imagem tripla com deslocamentos laterais: uma imagem para ordem zero e outras duas para as primeiras ordens de difração. Estas últimas estariam deslocadas lateralmente, em sentidos opostos, em relação à imagem formada pela ordem zero.

O ideal que se espera de uma grade de difração para aplicação com shearografia seria a formação de apenas duas imagens nítidas de mesma intensidade luminosa. Este efeito pode ser obtido manipulando-

se a forma da estrutura periódica da grade de difração [50]. Para isso, existem dois caminhos.

O primeiro é utilizar a estrutura periódica de fase em forma de dentes de serra. Desta forma é possível eliminar algumas ordens de difração e, por exemplo, concentrar a energia na ordem $m=0$ e ordem $m=1$. Na Figura 4.6 mostra-se o aspecto típico das estruturas de fase destas redes.

Figura 4.6 – Redes de difração com estrutura periódica de fase na forma de dentes de serra.



[51].

A segunda alternativa é extinguir a ordem zero e preservar as duas primeiras ordens, formando ângulos simétricos em relação à direção da ordem zero. Para isso, é necessário que a grade de difração tenha uma estrutura de fase binária, similar a um sinal quadrado, cuja altura produza um atraso de fase de π radianos (180°).

Assim, o feixe que atravessar a estrutura de fase pela parte baixa será defasado de meio comprimento de onda em relação ao que atravessar as partes altas da estrutura binária, gerando interferência destrutiva e cancelando a ordem zero.

Grades que preservem as primeiras ordens ($m=-1$ e $m=+1$) reduzem, pela metade, o deslocamento transversal do PZT necessário para aplicar o mesmo deslocamento de fase em uma grade que preserve as ordens 0 e 1.

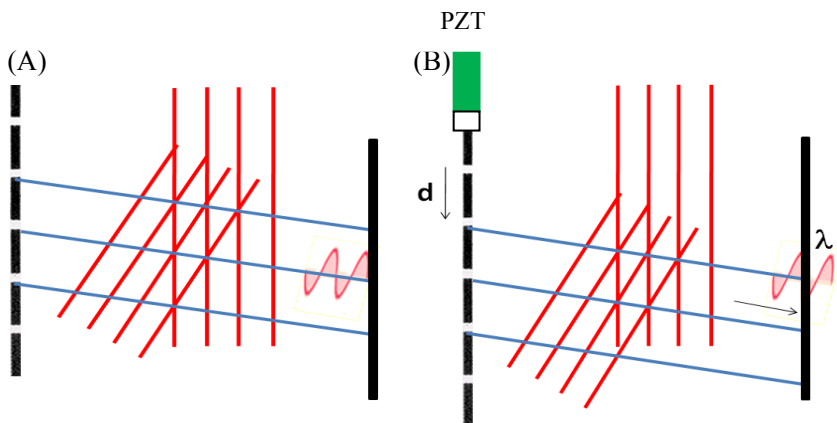
A principal motivação para usar redes de difração em shearografia é a compactação que esta proporciona ao módulo de formação de imagens, pois o módulo difrativo utiliza menos componentes ópticos que o módulo com interferômetro de Michelson.

Para as grades que preservam apenas as primeiras ordens, um deslocamento transversal de meio passo da grade produz um deslocamento de fase de 2π radianos. Para as redes que preservam a ordem 0 e 1, o deslocamento transversal necessário é o dobro.

A Figura 4.7 ilustra o funcionamento do deslocamento de fase gerado por uma grade de difração de ordem 0 e 1. Em (A), a linha preta pontilhada representa a grade e as linhas vermelhas representam frentes de ondas, sendo que as linhas verticais representam a componente de ordem 0, e as inclinadas, a de ordem 1. A linha preta contínua representa o CCD da câmera e a senóide uma representação livre da figura de interferência luminosa no mesmo ponto da imagem gerada pelas frentes de onda 0 e 1 [32].

Em (B), a seta em “d” indica o sentido do deslocamento realizado pelo PZT responsável pela mudança de fase em “ λ ”.

Figura 4.7 – Deslocamento de fase por atuação de um PZT em uma grade de ordem $m=0$ e $m+1$. (A) Antes do deslocamento de fase. (B) Após deslocamento de fase.



4.3.4 Estudo de Otimização de Leiaute

O principal objetivo do estudo é identificar como maximizar o campo de visão do módulo em menor distância do corpo de prova possível, sem comprometer a qualidade da imagem. Foi utilizado o conjunto 2, especificado no tópico 4.3.2. Nos testes realizados, avaliou-se o descolamento lateral da imagem em função: da posição da grade entre o sensor da câmera e lente e da distância entre o módulo e o corpo de prova. A qualidade de imagem em função da posição da grade entre sensor e lente também foi avaliada.

Como já citado neste trabalho, ao aumentar a frequência, isto é, o número de fendas por unidade de comprimento de uma grade de difração, aumenta-se o ângulo de difração do feixe luminoso que a atravessa. Pode-se exprimir a frequência em termos do número de fendas por milímetro, isto é, “linhas por milímetro”, o que é muito comum em uma linguagem comercial. Assim, quanto maior o número de linhas maior será o deslocamento lateral proporcionado pela grade.

A rede de difração utilizada tem as seguintes características:

- Fornecedor: Edmund Optics;
- Dimensões: 25mm x 25mm x 3 mm \pm 0,5mm;
- Número de linhas/mm: 70;
- Ordens de difração ativas: +1 e 0;
- Porcentagens de transmissão para cada ordem: 41(+1), 32(0);
- Ângulos: 2,53°;
- Tipo de grade: Fase.

Os deslocamentos laterais em função das posições da grade estão expostos na Tabela 4.2. Nota-se que o deslocamento lateral aumenta com o aumento de distância entre o módulo e corpo de prova. A posição da grade entre sensor CCD e lente também tem influência no deslocamento lateral como visto na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Deslocamentos laterais, posições sensor-lente e módulo.

Ensaio	Posição da grade	Distância entre módulo e corpo de prova	Deslocamento lateral
1	Posicionada 0 mm do CCD	280 mm	4 mm
2	Posicionada 0 mm da lente	280 mm	13 mm
3	Posicionada 0 do CCD	1 m	14 mm
4	Posicionada 0 da lente	1 m	42 mm

Como o deslocamento lateral varia em função da posição do sensor e da lente em relação à grade, foi analisada a qualidade da imagem gerada em quatro posições. O protótipo foi colocado a 280 mm do corpo de prova. A distância máxima entre CCD e lente é de 8 mm, assim a grade foi posicionada em quatro posições: a 0 mm, 2 mm, 4 mm e a 8 mm do CCD, ou seja, 0 mm da lente. As Figuras 4.8, 4.9, 4.10 e 4.11 mostram as quatro imagens obtidas.

Nota-se que a qualidade da imagem é diferente à medida que a grade se distancia ou se aproxima da lente. A mesma apresenta ruído dificultando a identificação das franjas. Quanto mais próxima da lente, maior é o deslocamento lateral e pior é a qualidade da imagem. Quanto mais próxima do sensor menor é o deslocamento lateral e melhor é a qualidade da imagem.

Busca-se o equilíbrio destas características de forma que o deslocamento lateral seja suficiente para identificar os defeitos e a qualidade de imagem seja boa para poder quantificá-los e qualificá-los. Assim, sob esta perspectiva, foi considerada a melhor imagem na Figura 4.10, onde o sensor está 2 mm distante da grade.

Figura 4.8 – Grade posicionada 0 mm do CCD.



Figura 4.9 – Grade posicionada 8 mm do CCD e 0 mm da lente.

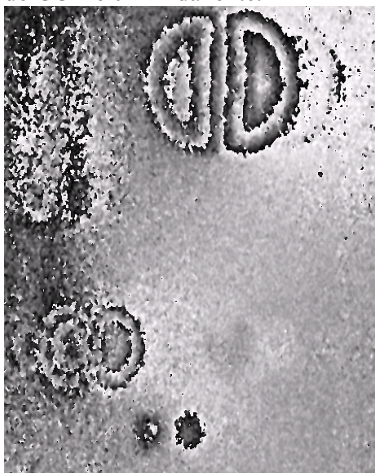


Figura 4.10 – Grade posicionada 2 mm do CCD.

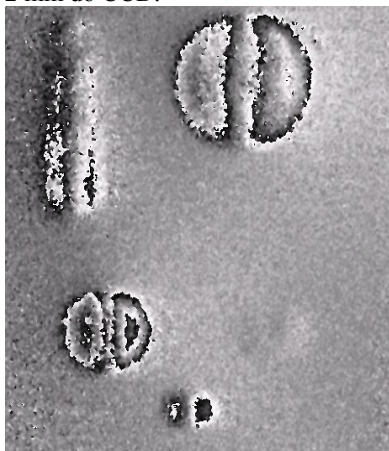


Figura 4.11 – Grade posicionada 4 mm do CCD.



4.3.5 Módulo Difractivo compacto (MD)

Com base nos resultados dos testes com o protótipo de avaliação, foi possível projetar e produzir um cabeçote otimizado e mais compacto para ensaios tanto em laboratório quanto em campo, como visto nas Figuras 4.12 e 4.13.

Foi utilizado o conjunto de câmera e de lente de número 3, apontado no tópico 4.3.2 como melhor escolha dentre outros componentes avaliados. A grade de difração foi posicionada a 2 mm de distância do sensor e a lente posicionada na sua distância focal do mesmo sensor, ou seja a 8 mm, sendo esta posição como a melhor escolha em relação aos parâmetros, deslocamento lateral e qualidade de imagem, apontada no tópico 4.3.4.

O módulo final tem a dimensão de 60 mm x 70 mm x 50 mm e massa de 0,350 kg. Com este módulo, o seu manuseio ficou mais simples, a regulagem de foco pode ser realizada ajustando-se a própria lente que ficou integralmente para fora do mesmo. O deslocamento lateral pode ser ajustado com atuação de parafusos no fundo do módulo no momento da montagem do mesmo.

Figura 4.12 – Cabeçote final vista 3D.

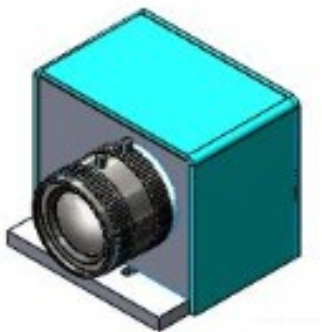
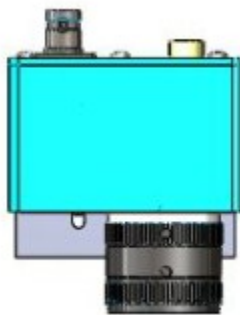


Figura 4.13 – Cabeçote final vista superior.



4.4 MÓDULO DE ILUMINAÇÃO

O módulo de iluminação tem a função de iluminar a superfície em análise com uma fonte de luz coerente (laser). Para gerar uma iluminação de uma área de aproximadamente $1,5 \times 1,5 \text{ m}^2$ de diâmetro, é preciso utilizar lentes de expansão.

O laser utilizado, mostrado na Figura 4.14, é do tipo DPSS, “*diode-pumped solid-state*”, de marca TORUS com potência 400 mW, fabricado pela LASER QUANTUM, com comprimento de onda de 532 nm.

Figura 4.14 – Laser de estado sólido de 400 mW.



Para ampliação da iluminação do sistema foram utilizadas duas lentes expansoras, uma lente que alinham os feixes em direção à abertura da segunda lente, sendo esta do tipo bicôncava.

Foi projetada uma cobertura onde é acoplado um suporte para as duas lentes com um bloqueador de luz para evitar acidentes. Com a expansão, a área iluminada aumentou para mais de 1 metro de diâmetro. Na Figura 4.15 mostra-se o módulo com o conjunto de lentes. Na Figura 4.16 mostra-se um corpo de prova iluminado pelo módulo de iluminação após adaptação para ampliação de grandes áreas

Figura 4.15 – Módulo de iluminação com conjuntos de lentes expansoras.



Figura 4.16 – Corpo de prova de 1,5 x 1,5 m² iluminado pelo módulo de iluminação.



4.5 MÓDULO DE CARREGAMENTO

O módulo de carregamento é o responsável por aplicar o carregamento externo no corpo de prova ou na superfície em teste. O tipo de carregamento usado é o térmico, onde o corpo de prova sofre um pequeno aquecimento por meio uma lâmpada halógena.

Foi utilizada uma lâmpada halógena de 500 W, com refletor de alumínio de massa 600 g, sendo esta suficiente para aquecer uma área de 1,0 m² em um curto espaço de tempo. O tempo de duração do carregamento é um fator importante para ensaios com shearografia e pode variar de 3 a 60 segundos.

Existem formas mais elaboradas de avaliação de defeitos onde o carregamento térmico no modo pulsado pode ser aplicado em ondas quadradas (liga/desliga) ou como formas de ondas senoidais. Ambos os modos e as respectivas frequências são controlados por software. Os modos pulsados não foram utilizados neste trabalho.

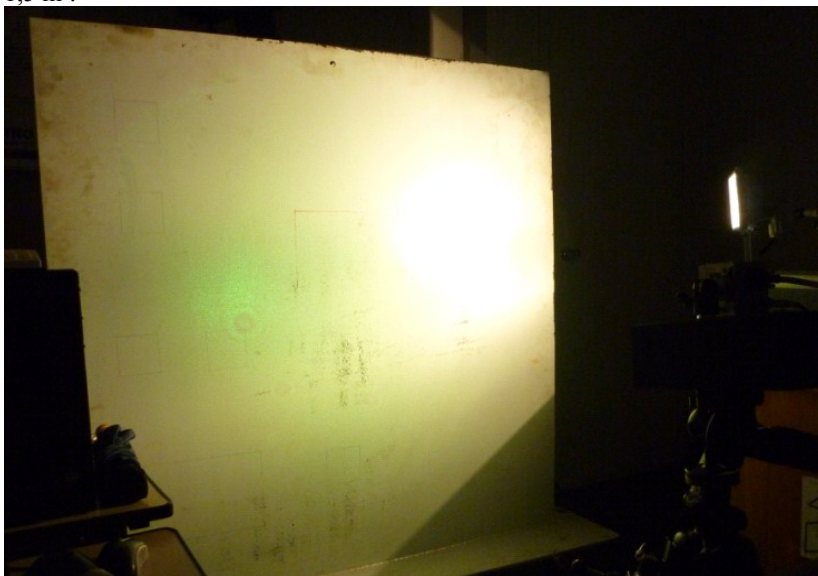
Nas Figuras 4.17 e 4.18 são visualizadas aplicações envolvendo o carregamento térmico aplicado em grandes áreas utilizando módulo de excitação com lâmpada halógena de 500 W de potência.

O conjunto lâmpada-refletor é de baixo peso e fácil mobilidade, atendendo assim os requisitos do projeto.

Figura 4.17 – Carregamento térmico aplicado no fundo de tanque.



Figura 4.18 – Carregamento térmico aplicado em um corpo de prova de 1,5 x 1,5 m².



4.6 SISTEMA DE SUPORTE E FIXAÇÃO

Para viabilizar a inspeção de grandes áreas foram usados tripés para suporte do equipamento com opção de uso de ventosas para fixação como mostram as Figuras 4.19, 4.20 e 4.21. O tripé é da marca MANFROTO, de capacidade de carga de 7 kg com três ventosas capazes de suportar sua carga máxima.

A capacidade de carga deste tripé é o suficiente para suportar e fixar o módulo de formação de imagens e iluminação em superfícies irregulares, como um revestimento em material compósito. A massa conjunta dos módulos de iluminação e de formação de imagem é 2,2 kg. Os módulos de carregamento e de aquisição de dados não utilizam o sistema de fixação.

Para gerar vácuo no sistema de ventosas foi utilizado um sistema de sucção por Venturi alimentado com ar comprimido a 8 bar de pressão, como visto na Figura 4.20.

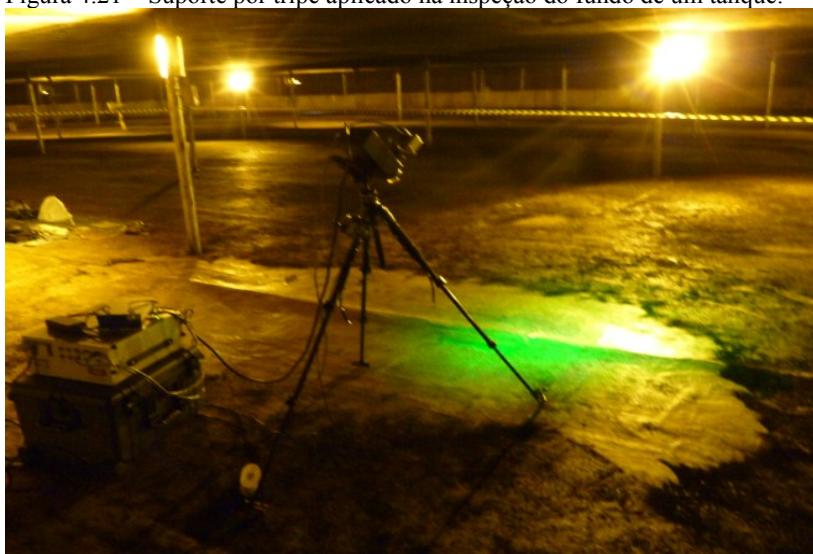
Figura 4.19 – Fixação do tripé por ventosas.



Figura 4.20 – Sistema sucção de vácuo para as ventosas.



Figura 4.21 – Suporte por tripé aplicado na inspeção do fundo de um tanque.



5 AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL

5.1 METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO

Para avaliar o desempenho do sistema de shearografia na inspeção de grandes áreas foram projetados um módulo de formação imagens, módulo de iluminação e um corpo de prova para teste de todo o sistema desenvolvido.

Considerando-se que um tanque de armazenamento pode possuir diâmetro que se aproximam de 100 m, as dimensões do corpo de prova estão longe de se igualar às do tanque, mas reproduzem uma porção da superfície que se pretende inspecionar.

O corpo de prova contém elementos artificialmente introduzidos para simular os diferentes defeitos mais comuns em revestimentos de materiais compósitos.

A validação do sistema foi realizada submetendo-se o corpo de prova a carregamentos térmicos contínuos por transmissão e reflexão, como visto nas Figuras 5.1 e 5.2, e assim verificando-se a capacidade do sistema de shearografia em detectar os defeitos artificiais em toda a extensão do revestimento e do aço.

Após a finalização da série de testes em laboratório, foi realizado um teste piloto em campo. O teste validou o sistema desenvolvido e identificou melhorias a serem incorporadas em versões futuras do mesmo.

Figura 5.1 – Carregamento térmico por transmissão.

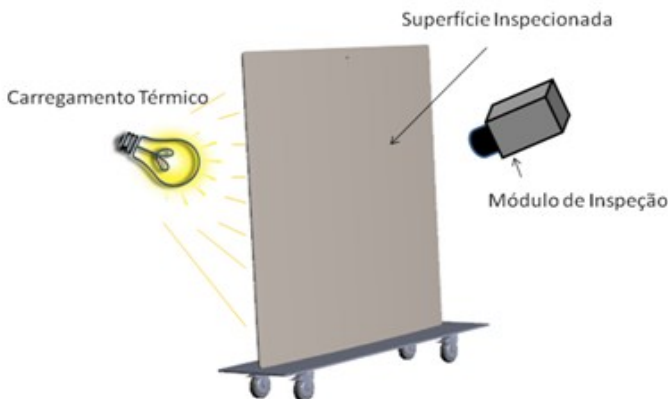
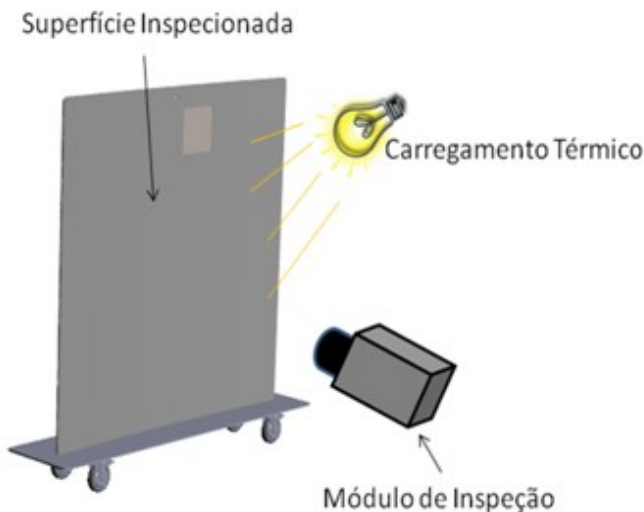


Figura 5.2 – Carregamento térmico por reflexão.



5.2 CORPO DE PROVA

O corpo de prova foi concebido para simular região de costado de um tanque com raio de 10 metros, tem a dimensão de $1,5 \times 1,5 \text{ m}^2$, espessura de 6,35 mm ($\frac{1}{4}$ de polegada) e é composto de aço ASTM A36. O revestimento foi aplicado na superfície côncava [48] [49].

A empresa RUST ENGENHARIA contribuiu com aplicação do revestimento usualmente utilizado em tanques de armazenamento de petróleo. A equipe do Labmetro participou da aplicação do revestimento e contribuiu com a elaboração dos defeitos implantados. A Figura 5.3 apresenta um desenho do corpo de prova com os defeitos indicados de “a” a “l”.

Na figura 5.4 é demonstrada a disposição das camadas do revestimento, onde cada camada tem aproximadamente 0,5 mm. O revestimento é composto por éster vinílico e fibra de vidro. Nas Figuras 5.5 e 5.6 serão especificados os defeitos implantados.

Figura 5.3 – Projeto corpo de prova com defeitos artificiais.

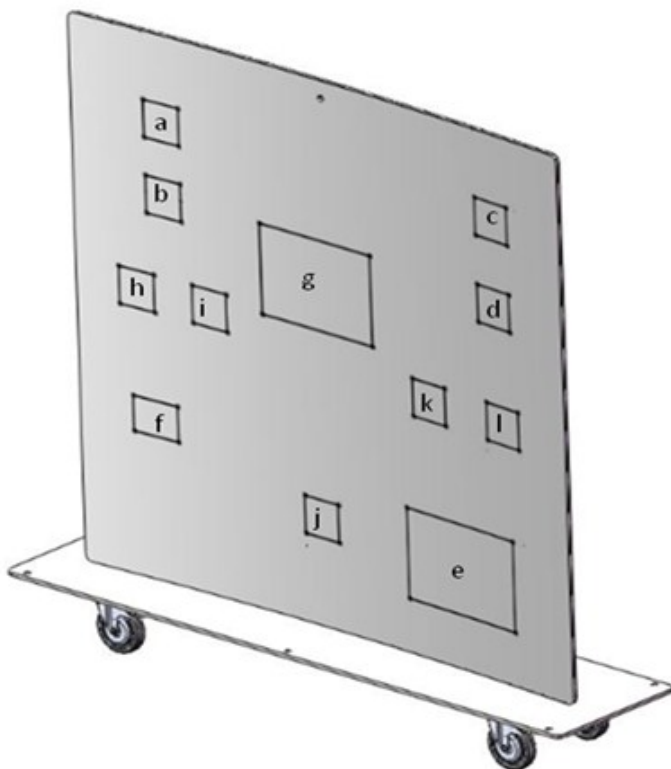


Figura 5.4 – Sequência de camadas do revestimento.

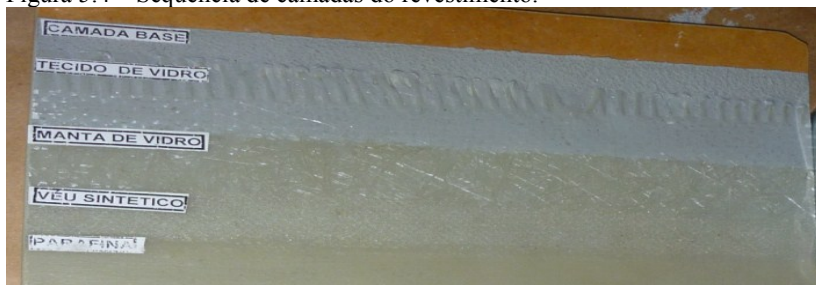
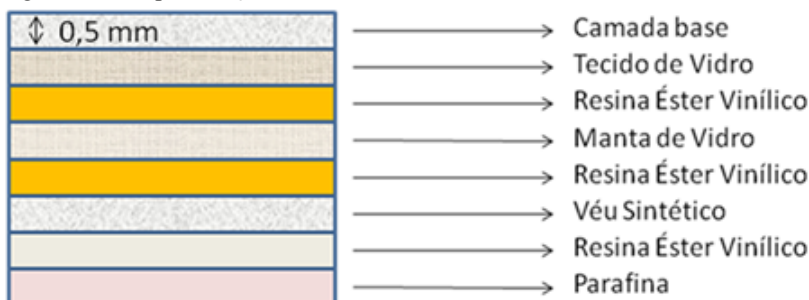


Figura 5.5 – Especificação das camadas.



Os onze defeitos artificiais implantados foram elaborados pelo Labmetro segundo [20]. Suas características são especificadas a seguir:

- a. Filme de polipropileno 0,1 mm duplo Pillow segundo norma SAE, ARP 5606, 100 x 100 mm² sob o aço.
- b. Filme de polipropileno 0,1 mm duplo Pillow segundo norma SAE, ARP 5606, 100 x 100 mm² sob o aço.
- c. Filme de teflon 0,3 mm duplo Pillow segundo norma SAE, ARP 5606, 100 x 100 mm² sob o aço.
- d. Filme de teflon 0,3 mm duplo Pillow segundo norma SAE, ARP 5606, 100 x 100 mm² sob o aço.
- e. Filme de polipropileno 0,1 mm duplo Pillow segundo norma SAE, ARP 5606, 220 x 330 mm² sob o aço.
- f. Cera – Camada de cera para evitar fixação da camada base com o aço.
- g. Janela – Ausência de revestimento – 220 mm x 297 mm²
- h. Filme de polipropileno 0,1 mm único filme, 100 x 100 mm², entre o tecido e manta de vidro
- i. Filme de polipropileno 0,1 mm único filme, 100 x 100 mm², entre o tecido e manta de vidro
- j. Filme de polipropileno 0,1 mm duplo segundo norma, 100 x 100 mm², entre o tecido e manta de vidro
- k. Filme de teflon 0,3 mm único filme segundo norma, 100 x 100 mm², entre o tecido e manta de vidro
- l. Filme de teflon 0,3 mm único filme segundo norma, 100 x 100 mm², entre o tecido e manta de vidro

Figura 5.6 – Especificação dos defeitos artificiais implantados. (coordenadas em milímetros).

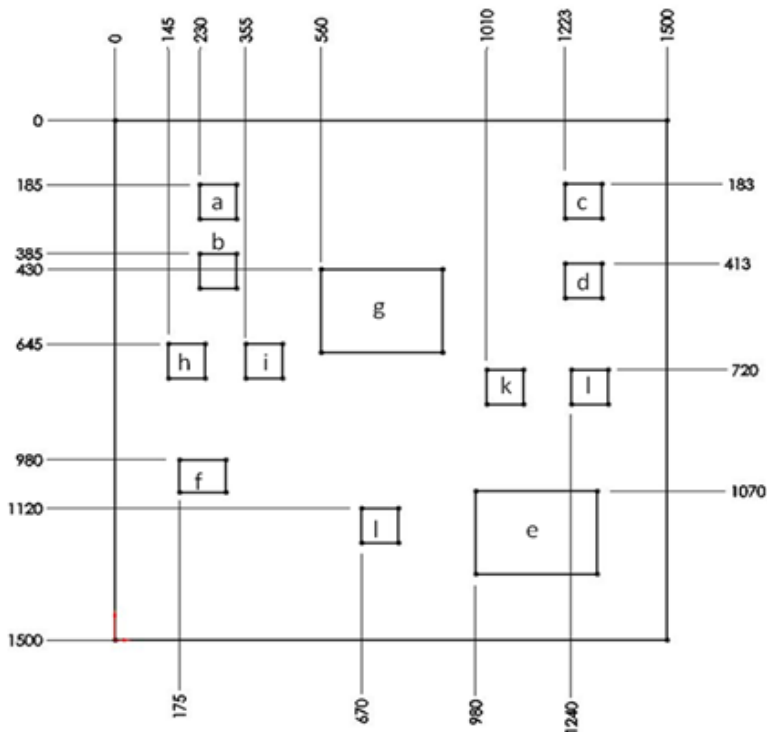


Tabela 5.1 – Especificação do corpo de prova.

Dimensões do corpo de prova (base de aço)	1500 mm x 1500 mm x 6,35mm
Espessura do revestimento	3,5 a 4,5 mm
Aço	ASTM A 36
Revestimento	Éster Vinílico, Fibra de vidro
Número de defeitos	12
Números de Camadas	10
Massa	180 kg

A Figura 5.7 mostra o corpo de prova final já em laboratório apto para os ensaios com shearografia.

Figura 5.7 – Aspecto externo do corpo de prova final.



5.3 ENSAIOS EM LABORATÓRIO

5.3.1 Carregamento térmico Interno

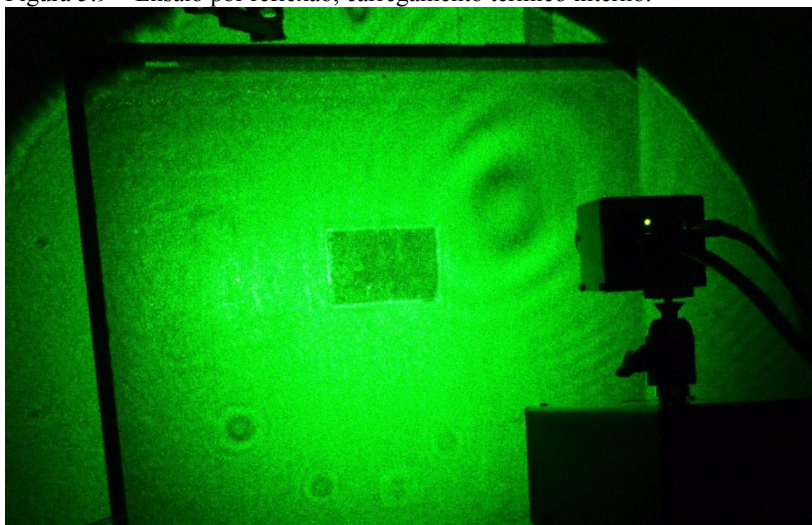
Denomina-se de lado interno do corpo de prova, a superfície na qual foi aplicado o revestimento. É a parte côncava que simula o lado interno do tanque. Ao se inspecionar um tanque durante a parada de manutenção, o procedimento de inspeção é realizado em seu lado interno, e é esta a situação reproduzida em laboratório como visto na Figura 5.8.

Figura 5.8 – Carregamento térmico interno.



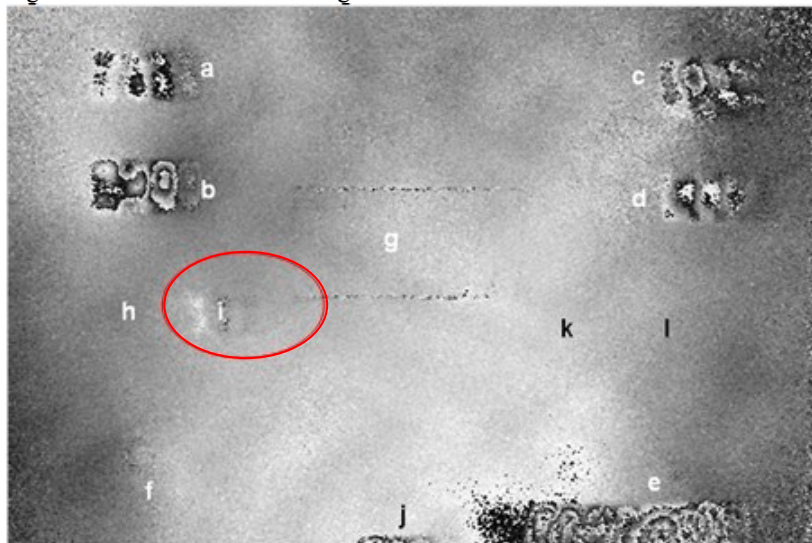
O carregamento térmico realizado foi por reflexão. A lâmpada halógena de 500 W foi colocada a 500 mm do corpo de prova de forma a lâmpada distribuir a radiação térmica de maneira mais uniforme. O pulso térmico teve duração de 8 segundos. O módulo de formação de imagens foi posicionado a 1,3 m do corpo de prova; distância grande o suficiente para que o sistema o visualize quase por inteiro, como mostrado na Figura 5.9.

Figura 5.9 – Ensaio por reflexão, carregamento térmico interno.



O deslocamento lateral proporcionado pelo módulo difrativo foi de 20 mm. Após a aplicação do carregamento térmico sobre o corpo de prova, obteve-se o resultado mostrado na Figura 5.10.

Figura 5.10 – Resultado do carregamento térmico interno.



A imagem da Figura 5.10 revela de maneira explícita a presença de seis defeitos implantados. No entanto, na área destacada pela elipse vermelha, ainda é possível identificar leves anomalias na região de dois defeitos conhecidos que estão circulados em vermelho.

Os defeitos visualizados com formação de franjas são os defeitos, *a*, *b*, *c*, *d*, *e* e *j*. Estes são aqueles aplicados sobre o aço, simulando delaminações. Estes defeitos são mais fáceis de serem identificados, pois a dilatação térmica diferencial naquela região é maior.

A porção aderida do revestimento dilata-se menos do que a porção descolada. Uma curta duração de carregamento térmico já é o suficiente para gerar formação de franjas ao inspecionar os mesmos.

O defeito circulado em vermelho é o defeito *i*, que pode ser identificado apesar de apresentar pequena diferença de fase. Este defeito está entre camadas do revestimento. Desta maneira, sua deformação não é tão acentuada em relação às regiões ao seu redor, e por isso não apresenta formação de franjas que evidenciem sua presença.

Os defeitos h , k e l , também estão entre camadas e não foram identificados pelo ensaio. O defeito f não foi identificado, talvez pelo fato da quantidade de cera aplicada não for suficiente para evitar a adesão da camada base naquela região.

A aplicação de um carregamento térmico de duração maior ou de modo pulsado e a utilização de um sistema de maior velocidade de aquisição dos mapas de fase (câmera com maior taxa de aquisição associada à aquisição temporal) podem ser boas alternativas para identificação dos defeitos, pouco e não visualizados neste teste. Esta alternativa não foi realizada por este trabalho.

5.3.2 Carregamento Externo

Embora não fizesse parte dos objetivos iniciais deste trabalho, porém de grande interesse para a setor de manutenção de tanques, foram realizados ensaios adicionais com o objetivo de se verificar a viabilidade de detectar defeitos no revestimento compósito, aplicando-se o carregamento térmico e observando as deformações pelo lado externo do tanque. Em outras palavras, tentou-se analisar se as deformações ocorridas no aço sofrem influência das falhas no revestimento interno.

Esta condição permitiria que fosse feita a inspeção sem necessidade de esvaziamento do tanque. O ensaio em campo demandaria menos tempo e o custo de inspeção seria menor, pois não seria necessária a parada de produção para realizar a inspeção.

Ao projetar o corpo de prova com os defeitos implantados, o defeito “ g ” caracterizou-se pela total ausência de revestimento. Representa a condição limite em que, em um tanque real, corresponderia ao arrancamento localizado do revestimento.

Do ponto de vista prático seria muito interessante viabilizar esta situação de dano a partir de uma inspeção inteiramente realizada pelo lado externo do tanque, isto é, sobre o aço. A expectativa é que a ausência do revestimento modifique a condução de calor naquela região suficientemente para que haja uma diferença de dilatação térmica detectável por shearografia.

O carregamento neste ensaio em laboratório foi realizado em dois modos: carregamento térmico por transmissão e carregamento térmico por reflexão. Por transmissão, o fluxo de calor deveria ser de dentro para fora. Seria então uma situação prática de difícil aplicação, possível apenas se uma rápida variação da temperatura fosse aplicada no fluido dentro do tanque.

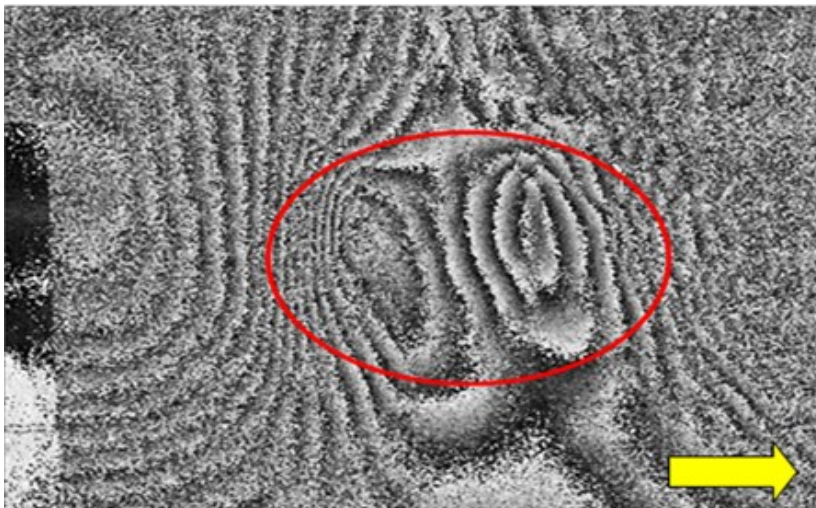
O ensaio com carregamento térmico por reflexão, onde o carregamento térmico é aplicado pelo lado externo, diretamente sobre o aço, reproduz a condição de maior praticidade com o tanque em operação. A Figura 5.11 mostra, por meio da elipse vermelha, a região do aço correspondente à ausência de revestimento no lado interno do corpo de prova.

Figura 5.11 – Região externa do corpo de prova. Elipse vermelha ilustra a posição do defeito “g” no revestimento da região interna.



Na região do defeito “g”, pelo lado interno, foi aplicado um carregamento térmico por transmissão com duração de 15 segundos com uma lâmpada de 500 W distante 100 mm da superfície. O módulo de formação de imagens foi posicionado pelo lado externo (do aço) a 2 metros de distância. Na Figura 5.12, a elipse vermelha identifica as franjas correspondentes à região do defeito “g” denunciando um padrão diferente de deformação naquela região. A seta amarela indica a direção do deslocamento lateral.

Figura 5.12 – Defeito “g” identificado por carregamento térmico por transmissão.



O segundo ensaio por carregamento externo foi por reflexão, ou seja, aplicação do carregamento térmico pelo lado do aço, como visto na Figura 5.13.

Figura 5.13 – Carregamento por reflexão realizado a partir do lado externo do corpo de prova.



Graças ao revestimento no lado oposto, o fluxo de calor gerado diminui e a porção do lado do aço tende a esquentar mais. Assim há uma diferença de gradientes de temperatura em função dos defeitos implantados no revestimento. No defeito “g” por exemplo, onde há ausência de revestimento, o aço perde calor mais facilmente e a região correspondente não esquenta tanto. Ali ocorre uma dilatação menor do que no resto do corpo, gerando assim os gradientes de deformação e possíveis formações de franjas.

Com base nesse conceito foi colocada, ao lado interno do corpo de prova do lado do revestimento, uma ventilação leve de acordo com a ilustração da Figura 14, de forma que assim o gradiente de temperatura aumente, ou seja, a perda de calor torna-se maior e assim a capacidade de evidenciar os defeitos melhora.

Utilizando esta modificação obtiveram-se os resultados nas Figuras 5.15 e 5.16 que identificam os defeitos *a* e *b*. A duração do carregamento térmico foi de 60 segundos e o módulo de formação de imagens ficou a 900 mm do corpo de prova. A lâmpada foi posicionada a 500 mm do corpo de prova, conforme mostrado na Figura 5.13.

Nesta situação, a ventilação pelo lado do revestimento aumentou o gradiente de temperatura na região ao redor dos defeitos *a* e *b*. Como estes defeitos se tratam de uma delaminação, há acúmulo de ar entre o revestimento e o aço, isso promove uma situação de retenção de calor naquela região. Assim a porção do aço, virada para o lado inspecionando dilata mais em comparação com toda porção do aço ao redor.

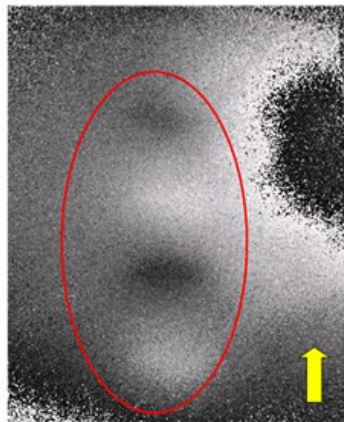
Figura 5.14 – Carregamento térmico externo por reflexão.



Figura 5.15 – Região do aço sob os defeitos “a” e “b”.



Figura 5.16 – Identificação dos defeitos “a” e “b”.



Nota-se que os defeitos podem ser identificados com certa dificuldade, pois não há formação de franjas completas. O gradiente de deformação na região do defeito ainda é inferior ao desejado, dificultado a qualificação e quantificação dos defeitos. Estes ensaios foram repetidos diversas vezes, e o interessante é que o tempo de duração de carregamento térmico é bem superior ao normalmente aplicado. A seta amarela indica a direção do deslocamento lateral.

5.4 ENSAIOS EM CAMPO

Os ensaios em campo foram realizados em um tanque de armazenamento de petróleo com teto flutuante, durante a parada de manutenção. Esta seção abordará as características do tanque, o equipamento utilizado, o procedimento de inspeção adotado e os resultados obtidos.

5.4.1 Tanque de armazenamento de petróleo

O tanque de teto flutuante possui 86,0 metros de diâmetro, 14,6 metros de altura, 6 anéis de aço ASTM A 283 Gr.C, sendo o primeiro anel com 11,2 mm de espessura e sexto anel com 9,5 mm de espessura.

Possui revestimento de 3,5 mm de espessura, em material compósito de resina Ester Vinílica com Fibra de Vidro em todo fundo do tanque e no costado até a altura de 1 metro no primeiro anel. A Figura 5.17 mostra a vista externa do tanque. A área interna do tanque é de 5808 m² e capacidade de armazenamento de 85510 m³, equivalente a 500 mil barris [17].

Um navio mercante brasileiro por exemplo pode transportar em torno de 1.000.000 de barris, equivalentes a dois tanques como o inspecionado [6].

Figura 5.17 – Tanque de armazenamento de petróleo.



A Figura 5.18 mostra a região de costado e fundo de tanque onde possui revestimento anticorrosivo de material compósito.

Figura 5.18 – Fundo e costado de tanque.



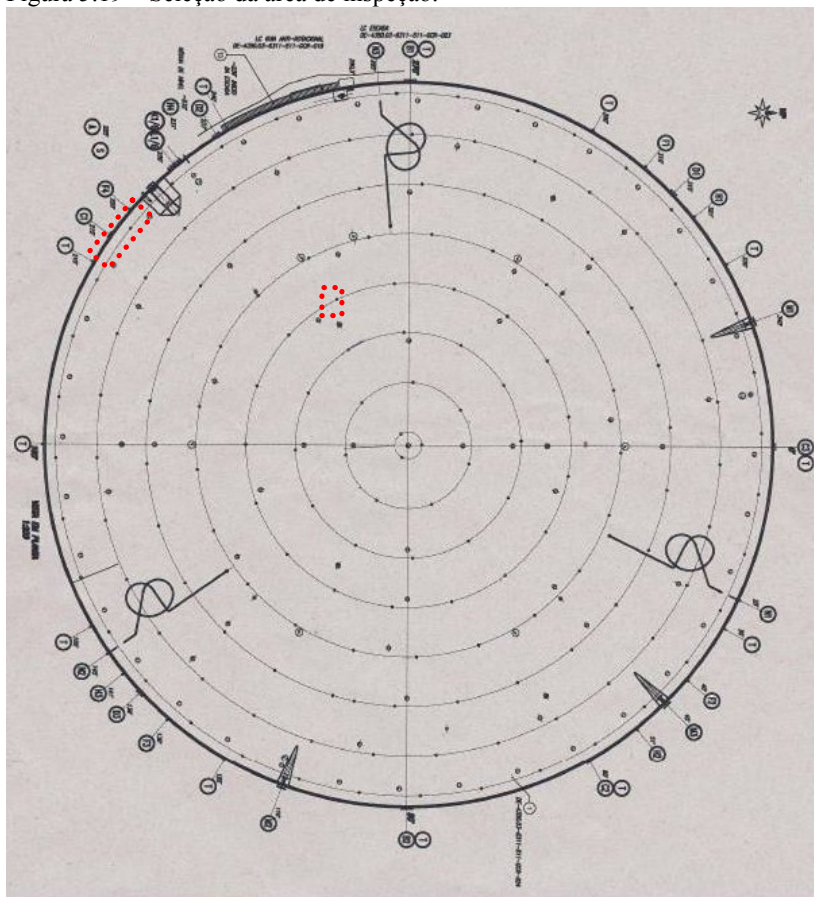
5.4.2 Procedimento de Inspeção Adotado e Resultados

O seguinte procedimento foi adotado para o teste em campo:

- Seleção da área de inspeção
- Limpeza e marcação da área de inspeção.
- Montagem e posicionamento sistema na área de medição.
- Configuração dos parâmetros de imagem (Foco, Ganho, área iluminada pelo laser).
- Configuração dos parâmetros do software.
- Aplicação do carregamento térmico com lâmpada de 500 W situada a distância de 0,5 metro a 1 metro da superfície.
- Aquisição automática das imagens.
- Análise dos resultados obtidos e verificação da presença de defeitos.

As áreas para ensaios foram demarcadas de forma aleatória: a primeira na região central no fundo de tanque e a segunda na região do costado, conforme indicadas em vermelho na Figura 5.19.

Figura 5.19 – Seleção da área de inspeção.



Transpetro.

A Figura 5.20 mostra, em verde, a área central do fundo do tanque escolhida para inspeção. Inicialmente, efetuou-se a limpeza da área para a retirada de poeira e resíduos de óleo. Devido à coloração clara do revestimento, não foi necessária a pintura das áreas de inspeção com tinta branca.

Após a limpeza, foram realizadas marcações de A1 até A14 (Figura 5.21) em retângulos de aproximadamente 350 mm x 450 mm, definidos de forma compatível com a altura inicial estabelecida para o

tripé. Foi adotado afastamento de aproximadamente 1 metro do cabeçote até a área de medição.

Figura 5.20 – Limpeza e marcação da área de inspeção.



Figura 5.21 – Marcação das áreas A1 a A14.

350 mm						
A8	A9	A10	A11	A12	A13	A14
450 mm						
A7	A6	A5	A4	A3	A2	A1

As Figuras 5.22 e 5.23 mostram a área de inspeção junto ao costado do tanque. Parte do fundo do tanque também foi inspecionada.

Figura 5.22 – Área de costado e fundo de tanque selecionada para inspeção.



Figura 5.23 – Inspeção do fundo de tanque junto ao costado.



Após selecionada a área de inspeção, o funcionamento do sistema é verificado com a utilização de um corpo de prova com defeitos conhecidos. A Figura 5.24 mostra o teste inicial do sistema com corpo de prova de dimensões de 185 mm X 120 mm.

Figura 5.24 – Verificação do funcionamento do sistema.



As Figuras 5.25 e 5.26 mostram as imagens obtidas durante a verificação inicial do sistema em campo, indicando o seu perfeito funcionamento. Após esta verificação, o sistema estava apto para realizar os testes.

Figura 5.25 – Verificação do sistema - imagem ao vivo.

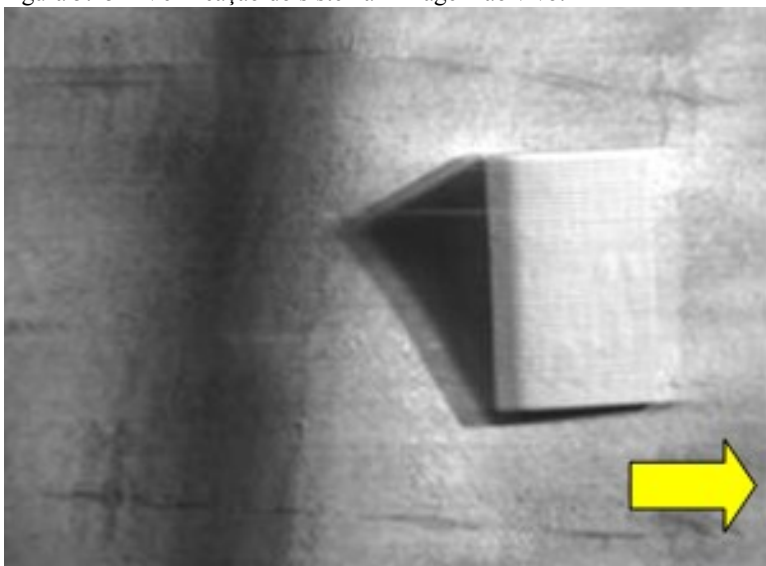
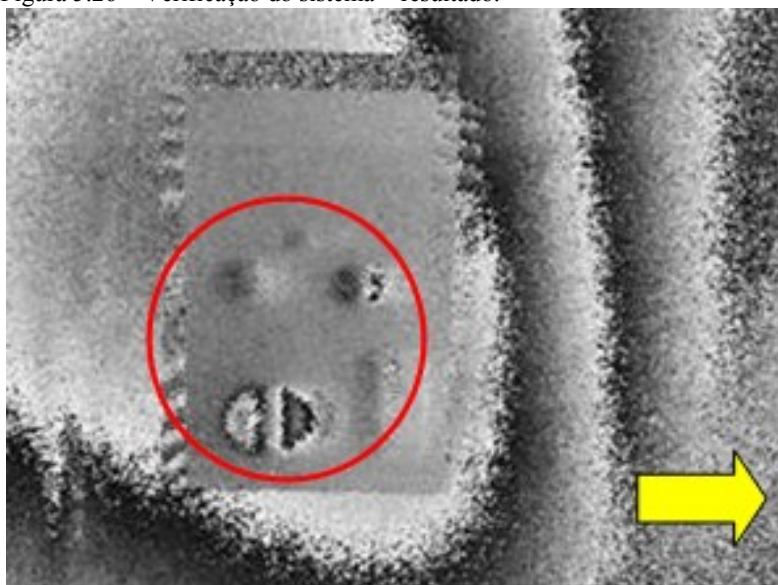


Figura 5.26 – Verificação do sistema – resultado.



Para os ensaios realizados no fundo e costado do tanque foram utilizados:

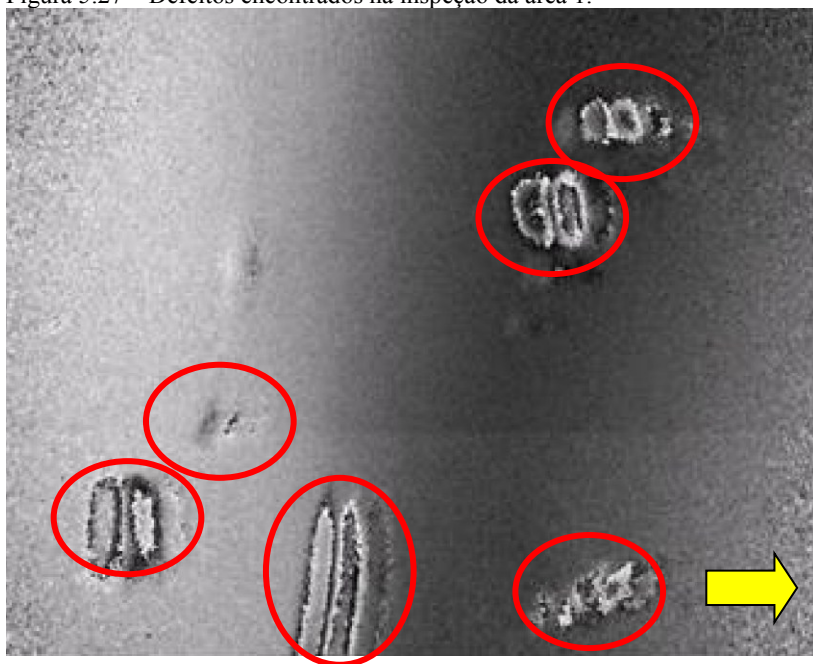
- Deslocamento lateral da ordem de 20 mm.
- Excitação térmica com uma lâmpada de 500 W com afastamento de aproximadamente 500 mm da área de medição por um tempo de aquecimento de 3 a 6 segundos.

Foram realizadas nove medições nas áreas demarcadas e seus resultados são apresentados a seguir. Em todas as imagens dos resultados os defeitos foram circulados em vermelho para melhor visualização. A seta amarela indica a direção do deslocamento lateral.

Área 1:

O campo de visão tem a dimensão aproximada de 350 mm x 450 mm e apresentou defeitos da ordem de 20 mm a 60 mm conforme indicado na Figura 5.27.

Figura 5.27 – Defeitos encontrados na inspeção da área 1.



Área 2:

O campo de visão tem a dimensão em torno de 350 mm x 450 mm e apresentou defeitos, visto em vermelho, da ordem de 20 mm a 50 mm como visto na Figura 5.28. Na Figura 5.29 indica o local de inspeção dentro das áreas demarcadas 1 e 2 e a direção do deslocamento de lateral.

Figura 5.28 – Defeitos encontrados na inspeção área 2.

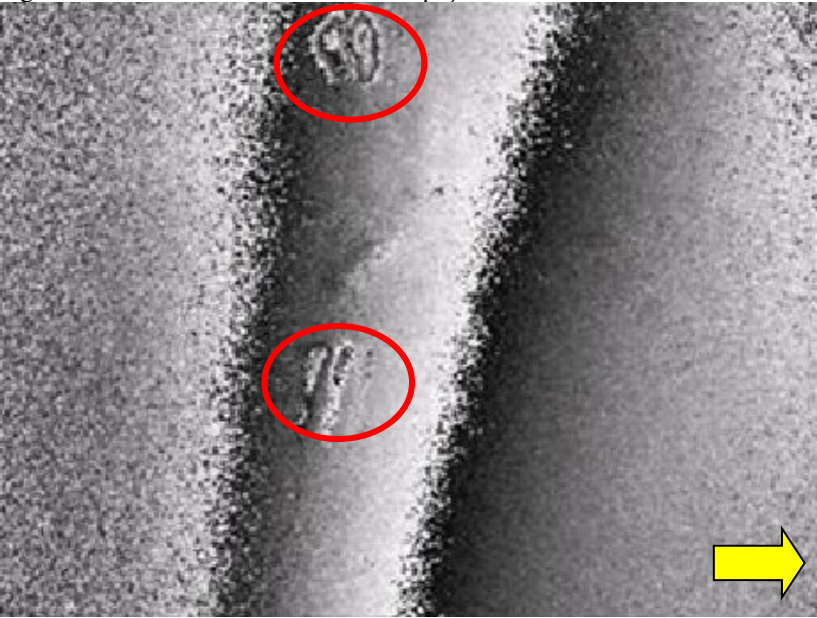


Figura 5.29 – Visualização das áreas 1 e 2.



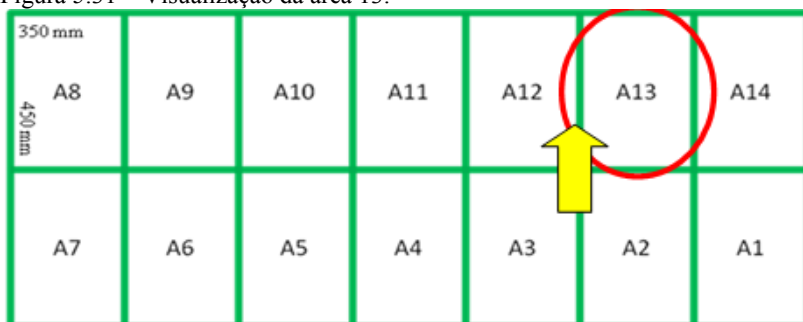
Área 13:

O campo de visão tem a dimensão em torno de 350 mm x 450 mm e apresentou defeito com comprimento da ordem de 210 mm conforme visto na Figura 5.30. Na Figura 5.32 defeitos na ordem de 50 mm da área 14. Nas Figuras 5.31 e 5.33 indica o local de inspeção dentro das áreas demarcadas 13 e 14 e a direção do deslocamento de lateral.

Figura 5.30 – Defeitos encontrados na inspeção da área 13.



Figura 5.31 – Visualização da área 13.



A14:

Figura 5.32 – Defeitos encontrados na inspeção área 14.

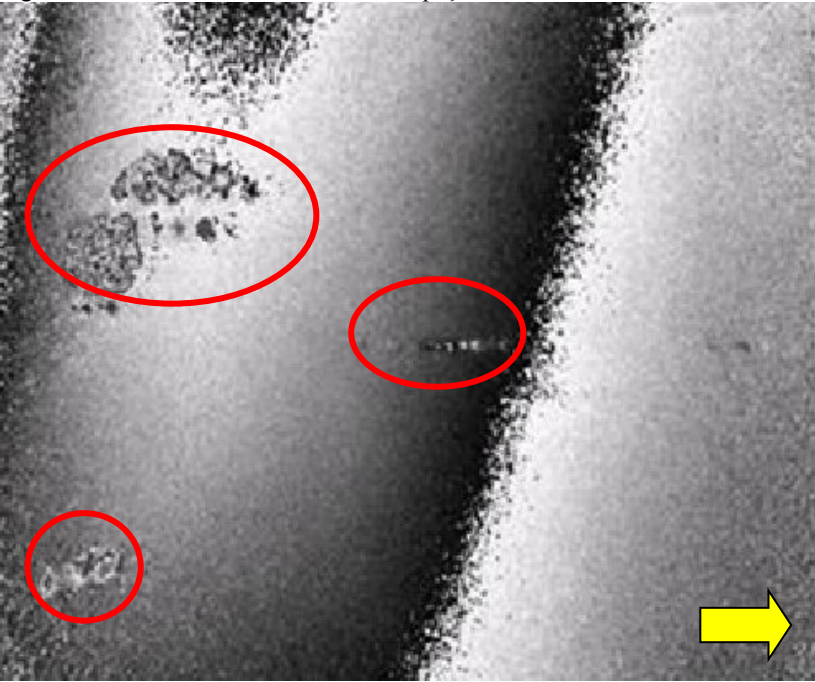


Figura 5.33 – Visualização da área 14.



Na Figura 5.34, os resultados das medições A1, A2, A13 e A14 foram dispostos lado a lado para que se tenha uma melhor compreensão dos resultados. No entanto, a sobreposição proposital existente entre as áreas medidas não foi excluída neste quadro e desta forma, nota-se a presença dos mesmos defeitos nas áreas 1 e 14. Na Figura 5.35 indica o local de inspeção das quatro áreas dentro da demarcação e a direção do deslocamento de lateral.

A presença dos mesmos defeitos em diferentes medições comprova a repetitividade da técnica.

Figura 5.34 – Reunião das áreas 1, 2, 13, e 14, sendo as áreas 14 e 13 sobrepostas em 1 e 2.

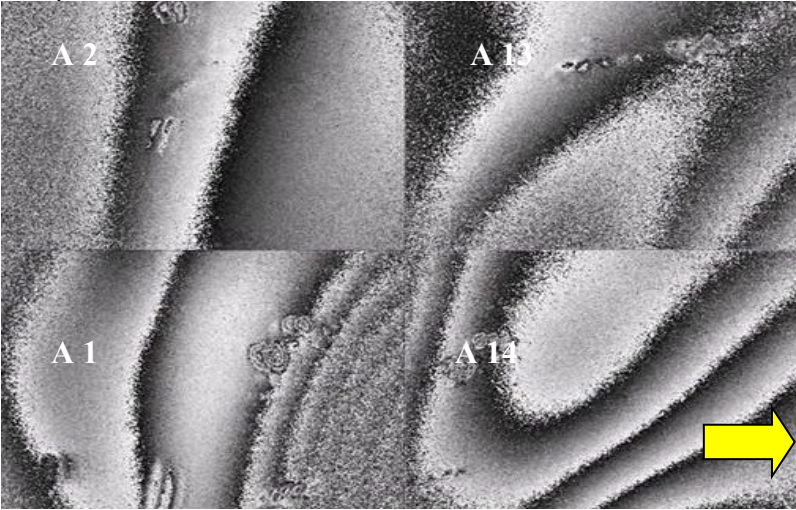
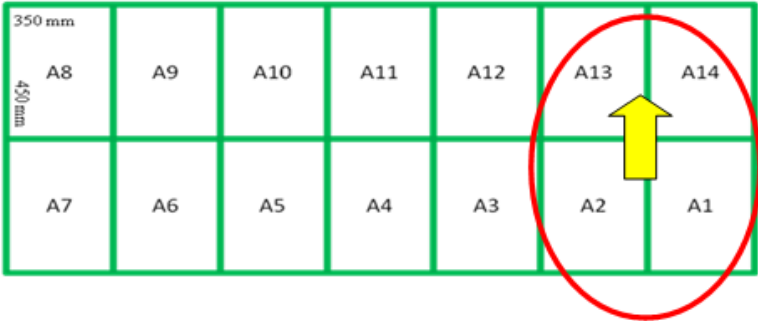


Figura 5.35 – Visualizações das áreas 1, 2, 13 e 14



Com o intuito de se verificar a capacidade do sistema na medição de áreas maiores, aumentou-se a altura do tripé, afastando-se o sistema de medição do fundo do tanque. Com isso, o sistema passou a visualizar uma maior área de aproximadamente 900 mm x 1400 mm. Conforme ilustrado na Figura 5.36, a área composta é formada pela concatenação das áreas de A4 a A11. Na Figura 5.37 está o resultado da medição.

Figura 5.36 – Marcação das áreas 4, 5, 6, 7, 8, 9 10 e 11.

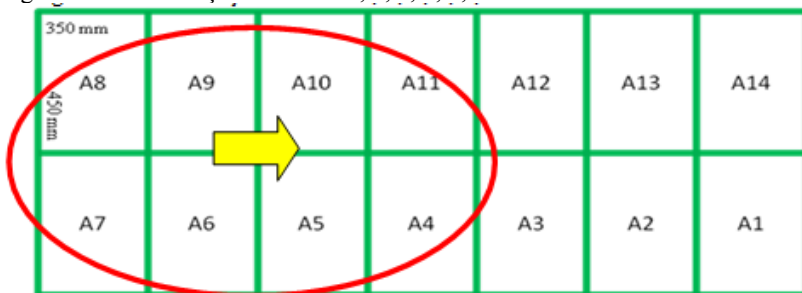
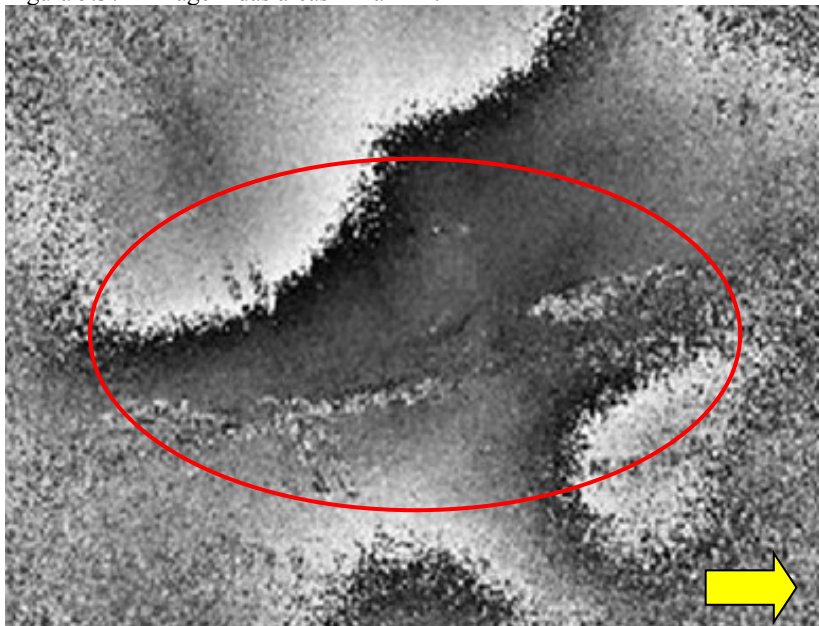
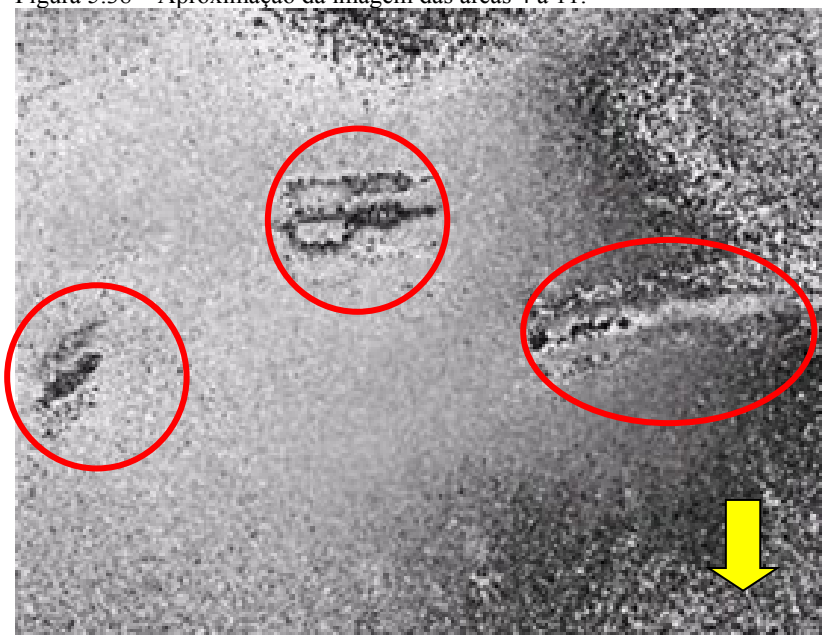


Figura 5.37 – Imagem das áreas A4 a A11.



Com o afastamento do sistema, ganha-se no aumento da área de medição, porém perde-se resolução e a capacidade de enxergar defeitos pequenos. A Figura 5.37, mostra a presença de algumas falhas na medição da área composta. Com o intuito de se obter uma melhor definição dos defeitos, aproximou-se novamente o cabeçote da área com os defeitos. O resultado desta nova medição é mostrado na Figura 5.38. O deslocamento da imagem foi vertical para baixo.

Figura 5.38 – Aproximação da imagem das áreas 4 a 11.

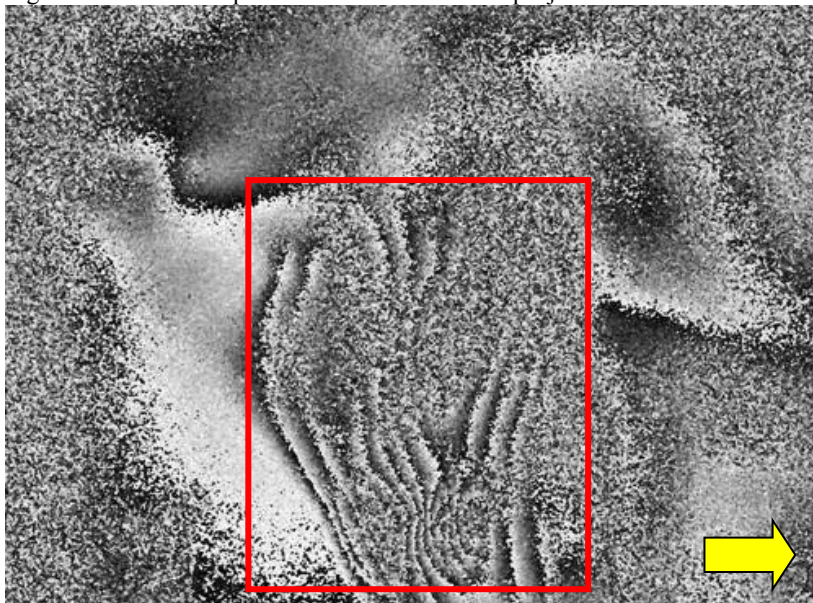


Na Figura 5.38 é possível visualizar três defeitos: o maior de 500 mm x 90 mm, o médio de 120 mm x 50 mm e o menor de 40 mm x 50 mm. As dimensões da área composta são de 1200 mm x 900 mm, obtidas com o sistema situado a uma distância de 1300 mm da superfície, medida a partir da lente objetiva.

A Figura 5.39 mostra o resultado obtido na inspeção do fundo do tanque próximo ao costado. O defeito encontrado tem dimensões aproximadas de 520 mm x 640 mm. Esta região do revestimento estava bastante descolada, pois notava-se o descolamento apenas tocando-se o revestimento com as mãos.

O grande descolamento e a movimentação de operários na área fizeram com que a imagem apresentasse um nível maior de ruído. No entanto, o defeito é facilmente identificado.

Figura 5.39 – Área inspecionada em fundo de tanque junto ao costado.



Na Figura 5.40 é visualizada a área selecionada para inspeção no costado. Na Figura 5.41 é visualizado o resultado obtido nesta área. Este defeito possui dimensões aproximadas de 1000 mm x 400 mm e seus limites foram desenhados sobre o revestimento com o auxílio de marcador industrial (caneta hidrográfica).

Figura 5.40 – Inspeção de costado.



Figura 5.41 – Resultado de inspeção da segunda área do costado.



6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Como conclusão deste trabalho neste capítulo será realizada uma análise ponto a ponto do que foi feito em cada módulo e dos resultados obtidos. Serão apontados os aspectos positivos e negativos de cada módulo, as possíveis melhorias e, por fim, serão deixadas algumas recomendações para projetos futuros.

6.1 ASPECTOS POSITIVOS

O sistema de medição otimizado para ensaios de grandes áreas apresentou resultados coerentes e repetitivos tanto em laboratório quanto em campo.

As mudanças realizadas nos módulos de formação de imagem, iluminação e carregamento térmico foram imprescindíveis para execução dos ensaios em áreas de aproximadamente de 1 m².

No módulo de formação de imagens, o aumento do campo de visão foi de 200 x 270 mm² para 1100 x 1400 mm², com o aumento da distância de trabalho de 450 mm para 900 mm. A área do campo de visão aumentou vinte e oito vezes em comparação com módulo anterior. A distância de trabalho apenas dobrou. A diminuição de sua massa foi também considerável, pois passou de 3,17 kg para 0,35 kg.

O aumento no raio da área iluminada foi de 400 mm para 900 mm, considerando-se a mesma distância de trabalho de 1300 mm nas duas situações. Este aumento foi de mais de 100%.

Não foram realizadas melhorias no módulo de carregamento térmico, pois a utilização de uma lâmpada de 500 W continuou sendo suficiente para execução dos ensaios. Graças ao módulo de aquisição de dados e ao software de controle, o acionamento do carregamento térmico pôde ser facilmente realizado no modo contínuo em intervalos de tempo especificados.

Para o sistema de suporte e fixação, o tripé foi de excelente praticidade. Sua massa de 3,5 kg e sua capacidade de carga de 7 kg foram suficientes para suporte dos módulos de iluminação e de formação de imagens, proporcionando boa mobilidade e os ajustes necessários para execução dos ensaios.

O tempo necessário para montagem e preparação do sistema para início dos ensaios foi de aproximadamente uma hora.

Com base nos ensaios realizados em laboratório e em campo, foi calculada uma média de tempo de 30 minutos por ensaio.

As concentrações de franjas presentes no capítulo 5 indicam pontos de gradientes de deformação e caracterizam falhas de adesão entre revestimentos compósitos e aço. Defeitos entre camadas não foram identificados. As imagens extraídas em todos ensaios, tanto em laboratório quanto em campo, apresentam o mesmo padrão de franjas. Este padrão tem similaridade com resultados extraídos anteriormente em outros trabalhos.

6.2 ASPECTOS NEGATIVOS E POSSÍVEIS MELHORIAS

Mesmo com melhorias realizadas, o sistema ainda apresenta algumas limitações. Do ponto de vista do projeto óptico-mecânico do módulo de formação de imagens, os ajustes de deslocamento lateral ainda podem ser melhorados. A posição da grade de difração entre sensor da câmera e a lente objetiva pode ser regulada acrescentando-se uma plataforma de translação axial, com ajuste micrométrico, que facilite o seu posicionamento.

O módulo de iluminação ainda é um sistema de grande massa, frágil e de alto custo. O laser utilizando proporciona excelente qualidade de luz, porém é recomendado para práticas em ambientes laboratoriais. Houve momentos que o mesmo apresentou variação aleatória de potência, comprometendo a execução de ensaio. Projetos futuros devem incorporar tipos de laser mais adequados para ambientes hostis e de massa e dimensões menores.

No carregamento térmico as melhorias devem seguir no sentido de aplicar novos modos de operação, como os modos de carregamento pulsado (onda quadrada e senoidais) contribuindo para maior sensibilidade do sistema, como já explicado no tópico 3.3.2. O posicionamento das lâmpadas pode ser otimizado para gerar aquecimento uniforme em toda superfície analisada e as lâmpadas podem ser anexadas ao sistema de fixação.

O módulo de suporte e fixação deve ser único para suportar os módulos de formação de imagens, iluminação e de carregamento em uma mesma estrutura. Deve ser de fácil mobilidade e montagem, devendo dispor um equipamento que auxilie na marcação da área inspecionada. A projeção das franjas sobre a superfície facilitará e agilizará a marcação dos defeitos no momento da inspeção.

Nos ensaios em campo houve interferências nas medições devido à presença de vibrações na estrutura inspecionada.

O tanque de armazenamento, mesmo estando fora de operação, no momento dos ensaios passava por manutenções diversas na sua

estrutura que geravam vibrações e comprometiam a execução dos ensaios. Este fato reforça a necessidade de um sistema de fixação mais rígido ou que seja capaz de suprimir o sinal vibratório externo.

A compactação do módulo de aquisição de dados é necessária. Deve-se também pensar em uma forma de adaptá-lo a um invólucro mais resistente que o proteja contra choques de transporte, umidade e poeira da área de inspeção.

O software apresentou problemas de operação, acarretando no aumentando do tempo de inspeção. Deve-se pensar em melhorias no mesmo, com o propósito de deixá-lo mais robusto e com mais ferramentas que facilitem o trabalho do inspetor em campo.

6.3 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Mais uma vez, a shearografia mostrou-se uma técnica óptica viável para a identificação de delaminações em grandes áreas de revestimentos de materiais compósitos de baixa espessura aplicados a chapas de aço.

Isso possibilita aplicação da técnica em revestimentos não somente em tanques de armazenamento de petróleo, mas também em diversos tipos de estruturas revestidas por materiais compósitos e com características semelhantes.

Os trabalhos futuros devem caminhar no sentido de tornar o sistema mais rápido e de mais fácil aplicação em campo. Como sugestões para desenvolvimento de um novo sistema, foram elaboradas as metas propostas a seguir:

- Desenvolver um sistema único, em uma mesma estrutura, para movimentação e fixação dos módulos de formação da imagem, iluminação e carregamento, com capacidade de demarcar áreas com facilidade e ainda representar sobre o revestimento a presença de defeitos, via projeção de imagens.
- Desenvolver software robusto com capacidade para comandar:
 - Um ou mais módulos de formação de imagens simultaneamente, se necessário;
 - Diferentes modos de carregamentos térmicos: contínuo, pulsado em ondas senoidais e em ondas quadradas;
- Diminuir o tempo de inspeção com o intuito de viabilizar comercialmente a técnica de inspeção.

A shearografia tem alcançado resultados cada vez melhores na área do petróleo nos últimos anos. Com o avançar das atuais pesquisas, a sua aplicação em larga escala na prestação de serviços de inspeção em compósitos será alcançada muito em breve.

REFERÊNCIAS

- [1] ALBERTAZZI, A. G. et al. Detecção de Falhas de Adesão entre Mantas Poliméricas e Dutos usando Interferometria de Deslocamento Lateral. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS, 24, 2006, São Paulo. **Anais...** São Paulo, 2006.
- [2] WILLEMANN, D. P.; ALBERTAZZI, A. G.; MENICONI, L. C. Um Sistema Prático para Identificação e Localização de Defeitos em Revestimentos de Materiais Compósitos utilizando Shearografia. In: CONFERÊNCIA INTERNACIONAL SOBRE TECNOLOGIA DE EQUIPAMENTOS, 9, 2007, Salvador. **Anais...** Salvador, 2007.
- [3] WILLEMANN, D. P. DETECÇÃO DE DEFEITOS EM JUNTAS ADESIVADAS DE TUBOS COMPÓSITOS COM SHEAROGRAFIA, TERMOGRAFIA E ULTRA-SOM. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS, 26, 2008, São Paulo. **Anais...** São Paulo, 2008.
- [4] SCHÖNTAG, J. M. **Caracterização da profundidade de defeitos em materiais compostos utilizando shearografia com carregamento vibracional**. 2009, 107 f. Dissertação (Mestrado em Metrologia Científica e Industrial) – Curso de Pós-Graduação em Metrologia Científica e Industrial, Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Florianópolis, 2009.
- [5] OLIVEIRA, J. L. Revestimentos Anticorrosivos para Taques de Armazenamento de Petroquímicos. **Revista Petro & Química**. São Paulo, n.319, p. 75-84, 2009.
- [6] NAVIOS BRASILEIROS. Disponível em: <<http://www.naviosbrasileros.com.br/>>. Acesso em: 26 out. 2011
- [7] GAY, D.; HOA, V.S.; TSAI, W.S. **Composite materials, design e Applications**. London: CRC PRESS, 2003.

- [8] MALLICK, P.K. Introducing: Definitions, classifications and Applications. **In:** Composites Engineering Handbook. Michigan: P.K., 1997.
- [9] CALLISTER Jr, W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais:** Uma Introdução. Rio de Janeiro: LTC, 2002.
- [10] REZENDE, M. C.; COSTA, M. L.; BOTELHO, E. C. **Compósitos Estruturais, tecnologia e prática.** São Paulo: Artiber, 2011.
- [11] LEVY NETO, F.; PARDINI, L. C. **Compósitos Estruturais:** ciência e tecnologia. São Paulo: Edgar Blücher, 2006.
- [12] THOMAS, J. E. **Fundamentos de Engenharia de Petróleo.** 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência: PETROBRAS, 2004.
- [13] PETROBRAS. **N-2727** : Norma Interna Petrobras, Acesso Público. – Manutenção de Gasodutos e Oleodutos Submarinos, Rio de Janeiro, 2005.
- [14] RUST. Disponível em:
<<http://www.rust.com.br/galeria/petroleo--gas>>. Acesso em: 20 out. 2011.
- [15] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D3299 - 10** Standard Specification for Filament-Wound Glass-Fiber-Reinforced Thermoset Resin Corrosion-Resistant Tanks, 2010.
- [16] BUNKER. Disponível em:
<<http://www.bunkerengenharia.com.br/>>. Acesso em: 20 out. 2011.
- [17] AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. **Standard 650 -** Welded Tanks for Oil Storage, 2010.
- [18] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 15921:** Indústrias de petróleo e gás natural — Tubulação de compósito — Plástico reforçado com fibras de vidro (PRFV), Rio de Janeiro, 2011.

- [19] FIBER GLASS SYSTEMS. Disponível em:
<<http://www.ameron-fpg.com>>. Acesso em: 24 out. 2011.
- [20] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS.
E 2563-94: Standart Practice for Classifying Visual Defects in
Glass-Reinforced Plastic Laminate Parts, 2005.
- [21] MANUTENÇÃO E SUPRIMENTOS. Disponível em:
<<http://www.manutencaoesuprimentos.com.br>>. Acesso em: 24
out. 2011.
- [22] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENSAIOS NÃO
DESTRUTIVOS. Disponível em: <<http://www.abende.org.br>>.
Acesso em: 24 out. 2011.
- [23] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS.
E2533 – 09: Standard Guide for Nondestructive Testing of
Polymer Matrix Composites Used in Aerospace Applications,
2009.
- [24] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS.
E750 – 04: Standart Practice for Characterizing Acoustic
Emission Instrumentation, 2004.
- [25] LÓPEZ, F.; NICOLAU, V. P.; BONIN, E. Infrared
thermography applied to ceramic materials: numerical analysis
and experimental results. In: International Congress of
Mechanical Engineering, Gramado, 2009. **Proc.** Gramado,
2009.
- [26] PETROBRAS. **N-2137**: Determinação de Descontinuidade em
Película Seca de Tinta. PETROBRAS, 2007.
- [27] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS
D5162 – 08: Standart Practice for Discontinuity (Holiday)
Testing of Nonconductive Protective Coating on Metallic
Substrates, 2008.
- [28] WATER E WASTEWATER INFRASTRUCTURE. Disponível
em: <<http://jhlcivil.com.au>>. Acesso em: 24 out. 2011.

- [29] KJELL, J. G. **Optical Metrology**. Third edition. England: John Wiley & Sons, 2002.
- [30] RABAL, H.; HENAO, R.; TORROBA, R. Digital speckle pattern shearing interferometry using diffraction gratings. **Optics Communications**. La Plats, n. 126, p. 191- 196, 1995.
- [31] HARIHARAN, P. **Basics of interferometry**. Second edition. Sydney: Elsevier, 2007.
- [32] HECHT, E. **Óptica**, 2. Ed. Fundação Calouste Gulbenkian: Lisboa, 2002.
- [33] WILLEMANN, D. P. **Desenvolvimento de uma Roseta Óptica para Medições de Tensões e Deformações utilizando Holografia Eletrônica**. 2002, 117f. Dissertação (Mestrado em Metrologia Científica e Industrial) – Curso de Pós-Graduação em Metrologia Científica e Industrial, Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Florianópolis, 2002.
- [34] INTERFERÔMETRO DE MICHELSON 1. Disponível em: <<http://www.ifsc.usp.br/~lavfis/InterMichel-1.htm>>. Acesso em: 25 out. 2011. [apostila]
- [35] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **E 2581-07**: Standart Practice for Shearography of Polymer Matrix Composites, Sandwich Core Materials and Filament-Wound Pressure Vessels in Aerospace Applications, 2008.
- [36] HUNG, Y.Y.; HO, H.P. Shearography: An optical measurement technique and applications. Materials Science and Engineering. **A Review Journal**, n.49, p. 61–87, 2005.
- [37] HUNG, M.Y.Y. et al. Review and Comparison of Shearography and pulse Thermography for adhesive band Engineering. **J. Optical Eng.**, v. 46, n. 5, 2007.
- [38] STEINCHEN, W. et al. Application of shearography to quality assurance. **J. Mater. Process. Technol.**, v. 52, n. 1, p.141-150, 1995.

- [39] HUNG, Y.Y.; LIANG, C.Y. Image Shearing camera for direct measurement of surface strains. **Appl. Opt.**, v. 18, n. 7, p.1046-1051, 1979.
- [40] HUNG, Y.Y.; DURELLI, A. J. Simultaneous measurement of three displacement derivatives using a multiple image shearing interferometric camera. **J. Strain Anal.**, v. 14, p.81-88.
- [41] ROBINSON, D. W.; REID, G. T. Interferogram Analysis_digital Fringe Pattern Measurement Techniques. Taylor & Francis, 1993.
- [42] HARIHARAN, P.; OREB, B. F.; EJU, T. Digital phase shifting interferometry: a simple error-compensating phase calculation algorithm. **Appl. Opt.** V. 26, n. 13, p. 2054-1506, 1987.
- [43] MENNER, P.; BUSSE, G. Shearografic detection of thermal waves for non-destructive testing Institute of Polymer Technology - Non-Destructive Testing. In: International Society for Optical Engineering, Florianópolis, 2010. **Proceedings**, Florianópolis, 2010.
- [44] FRANÇA, L. N. F.; SOLETO Jr., J. **Introdução às Vibrações Mecânicas**. São Paulo: Blucher, 2006.
- [45] ASSOSSIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 7823-2:2002**: Chapas extrusadas calandradas, Tipos, dimensões e características, Rio de Janeiro , 2002.
- [46] PETROBRAS. **N-270**: Projeto de Tanque de Armazenamento Atmosférico, Rio de Janeiro, 2010.
- [47] ASSOSSIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR-11889_1992** - Bobinas grossas e chapas grossas de aço-carbono e aço de baixa liga e alta resistência.
- [48] PETROBRAS. **N-2913**: Revestimentos Anticorrosivos para Tanque, Esfera, Cilindro de Armazenamento e Vaso de Pressão, Rio de Janeiro, 2010.

- [49] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15205:** Armazenamento de Combustível - Revestimento Interno de Tanque Instalado, com criação de parede dupla e espaço intersticial, Rio de Janeiro, 2005.
- [50] RABAL, H.; HENAO, R.; TORROBA, R. Digital speckle pattern shearing interferometry using diffraction gratings. **Casilla de Correo**, La Plata, n. 124, 1999.
- [51] RICHARDSON GRATINGS. Disponível em:
<<http://www.gratinglab.com/>>. Acesso em: 26 out. 2011.